

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف  
*Université Hassiba BEN BOUALI –CHLEF*  
كلية الهندسة المدنية والمعمارية  
*Faculté de Génie Civil et d'Architecture*  
قسم الهندسة المدنية  
*Département de Génie-civil*



## **MEMOIRE DE MASTER**

**Filière : Génie Civil**

**Option : Structures**

*Thème :*

**Etude du comportement sismique de structures adjacentes  
tenant compte de l'interaction sol-structure**

Présenté par :  
Abdellah METLEF

Dirigé par :  
Prof. Zamila HARICHANE  
Mr. Ali BENZAMIA

2023 / 2024

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers ALLAH, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la puissance et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Je souhaite adresser un immense merci à Madame Zamila HARICHANE, Professeur à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, pour avoir proposé et dirigé ce thème de recherche. Je tiens également à remercier Monsieur Ali BENZAMIA, doctorant en Génie Civil, pour son soutien et son encadrement.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils porteront certainement à ce modeste travail de recherche en acceptant de l'examiner et de le compléter par leurs commentaires.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous les enseignants de la faculté de génie civil qui ont contribué à ma formation. Je tiens particulièrement à remercier Mme Djafar Henni Imane, Maître de Conférences « B » au département de Génie Civil, pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Oussama Amri, titulaire d'un master en Génie Civil, pour son aide précieuse tout au long de l'élaboration de ce projet.

## *Dédicaces*

*Je souhaite dédier ce modeste travail à mes chers parents et leur exprimer ma gratitude. Sans eux, je n'aurais jamais atteint cette étape de ma vie. Je leur témoigne tout mon amour sincère.*

*Je dédie ce fruit qui couronne cinq années de formation à ma chère mère qui a enduré tant de souffrances pour que je n'en endure aucune et qui n'a ménagé aucun effort pour me rendre heureux,*

*Je le dédie à mon cher père, l'homme précieux que Dieu m'a offert. Je lui dédie ce travail avec un profond respect et lui dois ma réussite.*

*Je le dédie également à mes chers frères et mes chères sœurs qui ont toujours apporté joie et bonheur à toute la famille. Que Dieu leur accorde une longue et heureuse vie. Merci pour votre amour et vos encouragements.*

*ABDELLAH*

## Résumé

Les bâtiments adjacents de moyenne à grande hauteur, en raison de leurs propriétés dynamiques divergentes, peuvent entrer en collision lors de secousses sismiques modérées à élevées, créant ainsi un phénomène connu sous le nom d'entrechoquement. Ce choc génère des forces additionnelles au niveau du diaphragme des structures, pouvant conduire à un écrasement local voire à l'effondrement de la structure. Ainsi, il devient impératif d'intégrer l'entrechoquement dans l'analyse et la conception sismique des structures. Des stratégies telles que l'utilisation de joints sismiques peuvent être envisagées pour atténuer ou prévenir les dommages potentiels, mettant en lumière l'importance cruciale de cette étude pour la résilience et la sécurité des structures face aux séismes. Par ailleurs, la plupart des études portant sur l'entrechoquement induit par les tremblements de terre ont négligé le type de sol et l'interaction sol-structure (ISS). Cependant, l'ISS et le type de sol exercent une influence significative sur la réponse des bâtiments en vibration du fait que la flexibilité induite par le sol diminue la rigidité des bâtiments en collision. Ainsi, ce thème de recherche a consisté à comprendre et évaluer l'impact du sol sur le comportement sismique des bâtiments voisins. Pour mieux voir le comportement des structures adjacentes face à un séisme et l'effet de l'interaction sol-structures (ISS) qui peut être favorable ou nuisible sur leurs réponses sismiques. Cette étude a consisté à la présentations l'ouvrage de référence qui est constitué de deux bâtiments (R+9) et (R+9). Les structures reposent sur une base fixe considérée comme encastree et toutes les vérifications nécessaires selon les Règles Parasismiques Algériennes (RPA99-2003) ont été effectuées. Puis, afin de tenir compte de l'ISS, le même ouvrage est étudié sur des bases flexibles pour trois types de sol différentes : rocheux (S1), meuble (S3) et très meubles (S4). L'ouvrage a été étudié sous l'effet de différents excitations enregistrées durant des séismes antérieurs. Les bâtiments sont calculés à l'aide du logiciel ETABS19. Les résultats sont obtenus en termes de périodes, déplacements, efforts tranchants et forces d'entrechoquement. Ces résultats ont permis de mettre en évidence l'importance de la prise en compte de l'ISS et l'entrechoquement dans le comportement sismique des bâtiments adjacents.

**Mots-clés :** Entrechoquement, Interaction sol-structure, structures voisines, Joint sismique, type de sol.

## Abstract

Adjacent medium to high-rise buildings, due to their divergent dynamic properties, can collide during moderate to high seismic shaking, creating a phenomenon known as pounding. This collision generates additional forces at the diaphragm level of the structures, potentially leading to local crushing or even the collapse of the structure. Thus, it becomes imperative to incorporate pounding into the seismic analysis and design of structures. Strategies such as the use of seismic joints can be considered to mitigate or prevent potential damage, highlighting the crucial importance of this study for the resilience and safety of structures in the face of earthquakes. Furthermore, most studies on earthquake-induced pounding have neglected the type of soil and the soil-structure interaction (SSI). However, SSI and soil type significantly influence the vibration response of buildings, as the flexibility induced by the soil reduces the stiffness of colliding buildings. Therefore, this research theme aimed to understand and evaluate the impact of soil on the seismic behavior of adjacent buildings. To better observe the behavior of adjacent structures during an earthquake and the effect of soil-structure interaction (SSI), which can be either favorable or detrimental to their seismic responses, this study presented a reference structure consisting of two buildings (G+9) and (G+9). The structures rest on a fixed base considered as embedded, and all necessary checks according to the Algerian Seismic Regulations (RPA99-2003) were carried out. Then, to account for SSI, the same structure was studied on flexible bases for three different types of soil: rocky (S1), soft (S3), and very soft (S4). The structure was studied under the effect of different excitations recorded during previous earthquakes. The buildings were analyzed using the ETABS19 software. Results were obtained in terms of periods, displacements, shear forces, and pounding forces. These results highlighted the importance of considering SSI and pounding in the seismic behavior of adjacent buildings.

**Key-words:** Seismic joint, pounding, adjacent structures, displacement, pounding force.

## ملخص

المباني المتجاورة متوسطة إلى عالية الارتفاع، نظرًا لخصائصها الديناميكية المتباينة، قد تتعرض للتصادم أثناء الهزات الزلزالية المتوسطة إلى العالية، مما يخلق ظاهرة تُعرف بالتصادم. ينتج عن هذا التصادم قوى إضافية على مستوى الديافراغم في الهياكل، مما قد يؤدي إلى سحق محلي أو حتى انهيار الهيكل. لذلك، يصبح من الضروري دمج ظاهرة التصادم في تحليل وتصميم الهياكل الزلزالية. يمكن النظر في استراتيجيات مثل استخدام الفواصل الزلزالية للتخفيف أو منع الأضرار المحتملة، مما يبرز الأهمية البالغة لهذه الدراسة في تعزيز مرونة وسلامة الهياكل في مواجهة الزلازل. علاوة على ذلك، فإن معظم الدراسات المتعلقة بالتصادم الناتج عن الزلازل أهملت نوع التربة وتفاعل التربة مع الهيكل (SSI) ومع ذلك، فإن تفاعل التربة مع الهيكل ونوع التربة يؤثران بشكل كبير على استجابة المباني للاهتزاز، حيث إن المرونة الناتجة عن التربة تقلل من صلابة المباني المتصادمة. لذلك، كان هدف هذا البحث هو فهم وتقييم تأثير التربة على السلوك الزلزالي للمباني المتجاورة. لدراسة سلوك الهياكل المتجاورة أثناء الزلازل وتأثير تفاعل التربة مع الهيكل (SSI) الذي يمكن أن يكون إيجابيًا أو سلبيًا على استجابتها الزلزالية، تم تقديم دراسة لهيكل مرجعي مكون من مبنيين (R+9) و (R+9) تستند الهياكل على قاعدة ثابتة تعتبر مغروسة، وتم إجراء جميع الفحوصات اللازمة وفقًا للقواعد الزلزالية الجزائرية (RPA99-2003) ثم، لأخذ تفاعل التربة مع الهيكل في الاعتبار، تم دراسة نفس الهيكل على قواعد مرنة لثلاثة أنواع مختلفة من التربة: صخرية (S1) ، رخوة (S3) ، ورخوة جدًا (S4). تمت دراسة الهيكل تحت تأثير اهتزازات مختلفة تم تسجيلها خلال زلازل سابقة. تم تحليل المباني باستخدام برنامج ETABS19 تم الحصول على النتائج من حيث الفترات الزمنية، الإزاحات، قوى القص، وقوى التصادم. أبرزت هذه النتائج أهمية أخذ تفاعل التربة مع الهيكل والتصادم في الاعتبار في السلوك الزلزالي للمباني المتجاورة.

**الكلمات المفتاحية:** المفاصل الزلزالية، الاصطدامات، إزاحة، قوة التصادم

## TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
ملخص.....	vii
Liste des symboles .....	viii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	2

### CHAPITRE 1 : Recherche bibliographique et synthèse de travaux antérieurs

1.1. Introduction .....	5
1.2. Causes du martèlement (entrechoquement ou collision) et remédiation	5
1.3. Modélisation des structures adjacentes et prise en compte de l'ISS .....	7
1.4. Méthodes d'approches de l'ISS .....	9
1.5. Type de l'interaction sol structure .....	10
1.5.1. Interaction cinématique .....	11
1.5.2. Interaction inertielle .....	12
1.6 Facteurs qui influencent la réponse des structures face à une sollicitation sismique .....	13
1.7. Effets de l'ISS sur la performance des structures .....	14
1.8 Synthèse de travaux antérieurs sur le comportement sismique des structures voisines en tenant compte de l'ISS .....	15
1.9. Conclusion .....	25

## **CHAPITRE 2 : Présentation de l’ouvrage de référence et calcul dynamique**

<b>2.1. Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2. Identification de l’ouvrage de référence .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1. Dimensions en plan .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2. Dimensions en élévation .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3. Caractéristiques des matériaux .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.1. Béton .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2. Acier .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4. Dimensions des éléments de la structure .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5. Chargement .....</b>	<b>32</b>
<b>2.6. Résultats .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.1. Analyse dynamique modale présentée dans RPA99/V 2003.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.2. Modélisation.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.3. Vérification dynamique de la structure (R+9) .....</b>	<b>35</b>
<b>2.7. Conclusion .....</b>	<b>39</b>

## **CHAPITRE 3 : Etude paramétrique des effets de l’ISS sur le comportement sismique des structures**

<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2. Calcul de la rigidité .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3. Comparaison et discussion des résultats .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.1. Les Réponses sismiques maximal .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.2. Déplacement inter-étages entre .....</b>	<b>46</b>
<b>3.4. Conclusion .....</b>	<b>50</b>

## **CHAPITRE 4 : Etude du comportement du joint sismique de type GAP**

<b>4.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.</b>	<b>Comportement de structures identiques .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>Réponses sismiques des structures .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.1.1.</b>	<b>Espacement .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.1.2.</b>	<b>Période fondamentale des structures .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.1.3.</b>	<b>Déplacement maximal Sd .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.1.4.</b>	<b>Effort tranchant .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Effort repris par le joint sismique dans les différents niveaux .</b>	<b>54</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>Déformation du GAP .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.</b>	<b>Comportement de structures non identiques .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Réponses sismiques .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.1.1.</b>	<b>Période fondamentale des structures .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.1.2.</b>	<b>Espacement .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.1.3.</b>	<b>Déplacement maximal Sd .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.1.3.</b>	<b>Effort tranchant .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>Force appliquée sur le GAP .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.3.</b>	<b>La Déformation du GAP .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>63</b>
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>65</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>68</b>

## *Liste des symboles*

Nous donnons ci-dessous les principales notations utilisées dans ce mémoire

<b>E</b>	: Module d'élasticité dynamique.
<b>F</b>	: Force.
<b>f</b>	: Fréquence.
<b>M</b>	: Moment.
<b>g</b>	: Accélération de la pesanteur.
<b>K</b>	: Rigidité d'un élément.
<b>K<sub>θ</sub></b>	: Raideur rotationnel.
<b>K<sub>h</sub></b>	: Raideur horizontal.
<b>K<sub>v</sub></b>	: Raideur vertical.
<b>m</b>	: La masse.
<b>P</b>	: Poids.
<b>S</b>	: Les ondes de cisaillement.
<b>T</b>	: Période fondamentale.
<b>T̄</b>	: Période fondamentale avec prise en compte de l'ISS
<b>T<sub>s</sub></b>	: Période fondamentale du sol.
<b>T<sub>1</sub> ; T<sub>2</sub></b>	: Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site.
<b>U<sub>g</sub></b>	: Déplacement harmonique.
<b>U<sub>i</sub>*</b>	: Représente le déplacement d'interaction cinématique.
<b>V</b>	: L'effort tranchant.
<b>δ</b>	: Déplacement.
<b>η</b>	: Coefficient de fissuration.
<b>θ</b>	: La rotation de la fondation.
<b>λ</b>	: Constante de lamé (module d'incompressibilité).
<b>ν</b>	: Coefficient de poisson.
<b>ξ</b>	: Pourcentage d'amortissement.
<b>C<sub>T</sub></b>	: Coefficient, fonction du système de contreventement

$\tau$	: Contrainte tangentielle (cisaillement)
$\sigma$	: Contrainte normale
$\gamma$	: poids volumique / surfacique
$\gamma_s$	: Coefficient de sécurité de l'acier
$\gamma_b$	: Coefficient de sécurité de béton
$f_{c28}$	: La résistance à la compression de béton a 28 jrs

## Liste des Figures

<b>Figure 1.1 :</b>	Exemples de bâtiments impactés par des heurts lors de trois tremblements de terre différents : (a) Bhuj (2001), (b) Népal (2015), et (c) Boumerdes (Algérie, 2003) .....	5
<b>Figure 1.2 :</b>	Séisme de Boumerdes en 2003 en Algérie [5] .....	6
<b>Figure 1.3 :</b>	Modèle des deux bâtiments en collision [8] .....	7
<b>Figure 1.4 :</b>	Modèle de la force de collision [9] .....	8
<b>Figure 1.5 :</b>	Méthodes d'approche et de modélisation de la fondation avec des ressorts verticaux et rotationnels, telles que présentées dans l'ASCE/SEI 41 du FEMA (2020) [14] .....	9
<b>Figure 1.6 :</b>	Illustration de mouvement en champ libre et de sa relation avec l'interaction cinématique et l'interaction inertielle (modifiée à partir de la Figure 1-2) [6] .....	11
<b>Figure 1.7 :</b>	Illustration de l'interaction cinématique Extraite de NIST 2012 [6] .....	11
<b>Figure 1.8 :</b>	: Illustration des effets de moyennage de la base de la dalle et des effets d'enfouissement à la Station CSMIP 23497 pendant le séisme de Whittier de 1987 : (a) plan de localisation de la fondation et du capteur ; (b) historiques temporels de l'accélération ; et (c) fonctions de transfert observées et basées sur le modèle [6] .....	12
<b>Figure 1.9 :</b>	Illustration schématique des déformations causées par une force appliquée à : (a) une structure à base fixe ; et (b) une structure avec flexibilité verticale, horizontale et rotationnelle à sa base. [6] .....	13
<b>Figure 1.10 :</b>	L'Impact de la hauteur sur (a) l'allongement de la période et (b) l'amortissement pour différents niveaux de flexibilité dans le sol [7] ...	14
<b>Figure 1.11 :</b>	Allongement de la période fondamentale [14] .....	15
<b>Figure 1.12 :</b>	Modèle discret d'interaction sol-fondation-[22] .....	15
<b>Figure 1.13:</b>	Valeurs maximales moyennes de la somme des rotations plastiques absolues des poteaux de chaque étage pour le cas de base fixe. (a) Bâtiment de 6 étages, (b) bâtiment de 12 étages [22] .....	16

<b>Figure 1.14 :</b>	Rapport des valeurs maximales moyennes de la somme des rotations plastiques absolues des poteaux avec ISS par rapport à ceux sans ISS : (a) Bâtiment de 6 étages, (b) bâtiment de 12 étages [22] .....	17
<b>Figure 1.15 :</b>	Comportement de structures adjacentes, différents scénarios d'entrechoquement, différentes configurations d'entrechoquement [24] ...	18
<b>Figure 1.16 :</b>	Comparaison des déformations latérales sous différents séismes [26] .....	20
<b>Figure 1.17 :</b>	Scénarios de collision [27] .....	21
<b>Figure 1.18 :</b>	Force de collision pour deux scénarios de collision [28] .....	22
<b>Figure 1.19 :</b>	Structures sélectionnées avec deux schémas de fondation (avec GAP et sans, GAP) [29] .....	24
<b>Figure 2.1 :</b>	Géométrie de la structure à étudiée .....	29
<b>Figure 2.2 :</b>	Vu en 3D de 2 structures jumelles à base fixe (l'ouvrage de référence)	39
<b>Figure 3.1 :</b>	La période fondamentale de la structure en fonction de type de sol sur l'axe (X-X) .....	42
<b>Figure 3.2 :</b>	L'effort tranchant Max de la structure en fonction de type de sol sur l'axe (X-X) .....	43
<b>Figure 3.3 :</b>	Déplacement Max de la structure en fonction de type de sol sur l'axe (X-X) .....	44
<b>Figure 3.4 :</b>	La période fondamentale de la structure en fonction de type de sol sur l'axe (Y-Y) .....	45
<b>Figure 3.5 :</b>	L'effort tranchant Max de la structure en fonction de type de sol sur l'axe (Y-Y) .....	45
<b>Figure 3.6 :</b>	Déplacement Max de la structure en fonction de type de sol sur l'axe (Y-Y) .....	45
<b>Figure 3.7 :</b>	Déplacement entre étage sur l'axe (X-X) .....	48
<b>Figure 3.8 :</b>	Déplacement entre étage sur l'axe (Y-Y) .....	49
<b>Figure 4.1 :</b>	Élément GAP .....	52
<b>Figure 4.2 :</b>	Vue en élévation qui représente l'élément GAP .....	53
<b>Figure 4.3 :</b>	La force exercée sur le GAP par rapport au différent niveau .....	54
<b>Figure 4.4 :</b>	La force exercée sur le GAP en fonction du temps .....	55
<b>Figure 4.5 :</b>	La déformation du GAP par rapport au différent niveau .....	56
<b>Figure 4.6 :</b>	Les deux structures adjacentes avec différente période .....	57
<b>Figure 4.7 :</b>	La force exercée sur le GAP en fonction du différent niveau .....	59
<b>Figure 4.8 :</b>	La force exercée sur le GAP en fonction du temps .....	60
<b>Figure 4.9 :</b>	La comparaison de la force exercée sur le GAP par rapport au différent niveau .....	61
<b>Figure 4.10 :</b>	La déformation du GAP par rapport au différent niveau .....	62

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 2.1 :</b>	Données géométriques des éléments de la structure étudiée.....	32
<b>Tableau 2.2 :</b>	Épaisseurs, poids volumique et poids surfacique des différents éléments du plancher terrasse.....	32
<b>Tableau 2.3 :</b>	Épaisseurs, poids volumique et poids surfacique des différents éléments du plancher courant.....	33
<b>Tableau 2.4 :</b>	Épaisseurs, poids volumique et poids surfacique des murs extérieurs.....	33
<b>Tableau 2.5 :</b>	Surcharge exploitation.....	33
<b>Tableau 2.6 :</b>	Nombre de modes à retenir pour la structure R+9.....	35
<b>Tableau 2.7 :</b>	Vérification de l'effort tranchant pour la structure R+9.....	37
<b>Tableau 2.8 :</b>	Vérification du déplacement selon X pour la structure R+9.....	37
<b>Tableau 2.9 :</b>	Vérification du déplacement selon Y pour la structure R+9.....	38
<b>Tableau 3.1 :</b>	Rigidité de ressort du sol .....	42
<b>Tableau 3.2 :</b>	Les réponses sismiques maximal de la structure suivant l'axe (X-X).	42
<b>Tableau 3.3 :</b>	Les réponses sismiques maximal de la structure suivant l'axe (Y-Y).	44
<b>Tableau 3.4 :</b>	Période fondamentale .....	47
<b>Tableau 3.5 :</b>	Déplacement entre étage sur l'axe (X-X).....	47
<b>Tableau 3.6 :</b>	Déplacement entre étage sur l'axe (Y-Y).....	49
<b>Tableau 4.1 :</b>	La force appliquée sur le joint par rapport aux différents niveaux ....	54
<b>Tableau 4.2 :</b>	Déformation de GAP (m) par rapport aux différents niveaux .....	56
<b>Tableau 4.3 :</b>	La force appliquée sur le joint par rapport aux différents niveaux ....	59
<b>Tableau 4.4 :</b>	Déformation de GAP (m) par rapport aux différents niveaux .....	62

---

## *Introduction Générale*

## **1. Problématique**

Dans la pratique courante, l'ingénieur est souvent amené à se fonder sur certaines hypothèses lui permettant de surpasser certaines difficultés mais cela le conduit très souvent à des résultats non fiables et parfois erronés. Une des hypothèses la plus couramment admise est de considérer la base de la structure comme un encastrement parfait. Cela est bien évidemment loin d'être vrai. La prise en compte des conditions réelles revient à considérer le sol comme une partie intégrante d'un système sol-structure. L'analyse de ce système découle d'un phénomène connu sous le nom d'interaction sol-structure.

D'autre part, les bâtiments adjacents de moyenne à grande hauteur, en raison de leurs propriétés dynamiques divergentes, peuvent entrer en collision lors de secousses sismiques modérées à élevées, créant ainsi un phénomène connu sous le nom d'entrechoquement. Ce choc génère des forces additionnelles au niveau du diaphragme des structures, pouvant conduire à un écrasement local voire à l'effondrement de la structure. Ainsi, il devient impératif d'intégrer l'entrechoquement dans l'analyse et la conception sismique des structures. Des stratégies telles que l'utilisation de joints sismiques peuvent être envisagées pour atténuer ou prévenir les dommages potentiels, mettant en lumière l'importance cruciale de cette étude pour la résilience et la sécurité des structures face aux séismes. Par ailleurs, la plupart des études portant sur l'entrechoquement induit par les tremblements de terre ont négligé le type de sol et l'interaction sol-structure (ISS). Cependant, l'ISS et le type de sol exercent une influence significative sur la réponse des bâtiments en vibration du fait que la flexibilité induite par le sol diminue la rigidité des bâtiments en collision.

## **2. Objectifs visés**

L'objectif principal de ce thème de recherche est de comprendre et d'évaluer l'impact du sol sur le comportement sismique des bâtiments voisins visant des conceptions plus sûres et à une meilleure prévention des dommages sismiques.

Une étude comparative et paramétrique entre des structures à base fixe et d'autres à base flexible sera développée. Ce mémoire traitera plus particulièrement le cas des bâtiments de hauteur moyenne dans le but d'évaluer et de quantifier l'effet de l'interaction sol-structure sur l'entrechoquement entre les structures voisines.

### **3. Organisation du mémoire**

Le mémoire du présent projet est organisé en quatre chapitres après une introduction générale.

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur le comportement des structures adjacentes en tenant compte de l'interaction sol structure et une synthèse de travaux antérieurs menés par des chercheurs dans ce domaine.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation et la vérification de l'ouvrage de référence (à base fixe) selon les Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 (version 2003).

Le chapitre trois consiste en une étude comparative entre l'ouvrage de référence à base fixe à des structures à base flexible posées sur différents types de sol : sol rocheux, sol meuble et sol très meuble.

Dans le quatrième, des joints sismiques de type élément GAP sont placés entre deux bâtiments adjacents et leur comportement est étudié tout en tenant compte de l'ISS sur le type de sol S4 (très meuble). Ensuite, nous changeons les propriétés d'une des deux structures pour avoir des périodes fondamentales différentes des deux structures pour mieux inspecter l'entrechoquent et voir de plus près le comportement du joint sismique.

# Chapitre 1

---

*Recherche bibliographique et synthèse de travaux  
antérieurs*

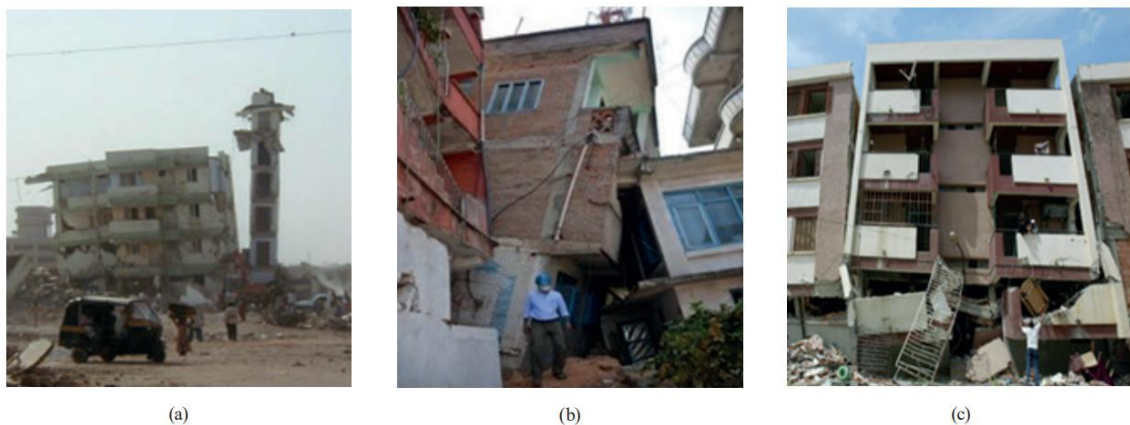
## 1.1. Introduction

L'interaction sol-structure (ISS) peut avoir une influence substantielle sur le comportement des bâtiments lors de secousses sismiques et sur la manière dont ils devraient être conçus. Cependant, il y a relativement peu de mise en œuvre des effets de l'ISS par les ingénieurs en exercice.

## 1.2. Causes du martèlement (entrechoquement ou collision) et remédiation

L'un des désastres naturels les plus importants auxquels la société humaine est confrontée aujourd'hui est le désastre causé par les tremblements de terre, caractérisé par sa soudaineté et sa destructivité. Ces dernières années, la protection contre les effets destructeurs des séismes a reçu une attention considérable, en particulier en ce qui concerne les collisions entre les structures adjacentes, notamment lors de tremblements de terre précédents tels que ceux de Mexico en 1985 [1] et le séisme de Bhuj du 26 janvier 2001 en Inde [2]. Des heurts ont également été observés lors de tremblements de terre récents, tels que ceux de Christchurch (Nouvelle-Zélande, 2011) [3] et de Gorkha (Népal, 2015) [4] (Figure 1.1). En Algérie, des collisions entre bâtiments adjacents ont été observés lors du séisme de Boumerdes en 2003 de magnitude  $M = 6,8$  [5] (Figure 1.2).

La majorité des dommages observés lors de ces tremblements de terre ont été causés par des heurts entre deux structures adjacentes situées trop près l'une de l'autre et l'espace entre elles ne satisfaisait pas à la distance minimale requise pour qu'elles vibrent librement



**Figure 1.1** : Exemples de bâtiments impactés par des heurts lors de trois tremblements de terre différents : (a) Bhuj (2001), (b) Népal (2015) et (c) Boumerdes (Algérie, 2003).

Dans les figures (b) et (c) ci-dessus on voit clairement que les bâtiments se sont rentrés en collision entre eux, ce qui a aggravé les conséquences. Les chercheurs ont appelé ce phénomène le martèlement ou l'entrechoquement entre deux structures adjacentes. Ce dernier est dû à une sous-estimation de l'espacement entre les deux structures.



**Figure 1.2 :** Séisme de Boumerdès en 2003 en Algérie [5]

Dans le cas du séisme de Boumerdès, c'est que les bâtiments ont subi une translation, et une rotation par rapport au sol sur lequel reposent leurs fondations. Ça nous a permis de dire qu'en réalité les fondations d'un bâtiment ne sont pas parfaitement encastées au sol, mais plutôt articulées. Le fait de ne pas prendre en considération que les fondations sont articulées, mène à des résultats de conception erronés car ce phénomène change totalement ou partiellement la réponse sismique de la structure.

Une analyse de l'interaction sol-structure sismique évalue la réponse collective de la structure, de la fondation et du milieu géologique sous-jacent et entourant la fondation, à une vibration spécifiée du sol en champ libre. Les effets de l'ISS sont absents pour la condition théorique d'une fondation rigide supportée sur un sol rigide. Par conséquent, l'ISS prend en compte la différence entre la réponse réelle de la structure et la réponse relative à la condition théorique de base rigide [6]

Le terme ISS se réfère à l'interface de contact entre la fondation de la structure et le sol sous-jacent.

Lorsque la structure est relativement rigide par rapport au sol, des rotations et translations de la fondation par rapport au mouvement en champ libre peuvent se produire, s'ajoutant ainsi aux déplacements structuraux et allongeant la période fondamentale de la structure. L'allongement de la période peut affecter les accélérations spectrales associées utilisées dans la conception sismique.

Cet effet se produit couramment dans les bâtiments dotés d'un système concentré de résistance latérale, tels que les murs de cisaillement en béton armé et les ossatures métalliques contreventées qui reposent sur des éléments de fondation localisés sur des sols flexibles. À l'inverse, pour un bâtiment avec des fondations larges et rigides sur des sols très rigides et des superstructures

relativement flexibles, l'impact de la flexibilité du sol sur la réponse du bâtiment est généralement relativement faible [7].

### 1.3. Modélisation des structures adjacentes et prise en compte de l'ISS

Les structures adjacentes sont généralement modélisées comme des systèmes à plusieurs degrés de liberté, avec des masses concentrées aux niveaux de leurs étages sous l'hypothèse d'une base fixe comme illustré dans la Figure 1.3 [8].

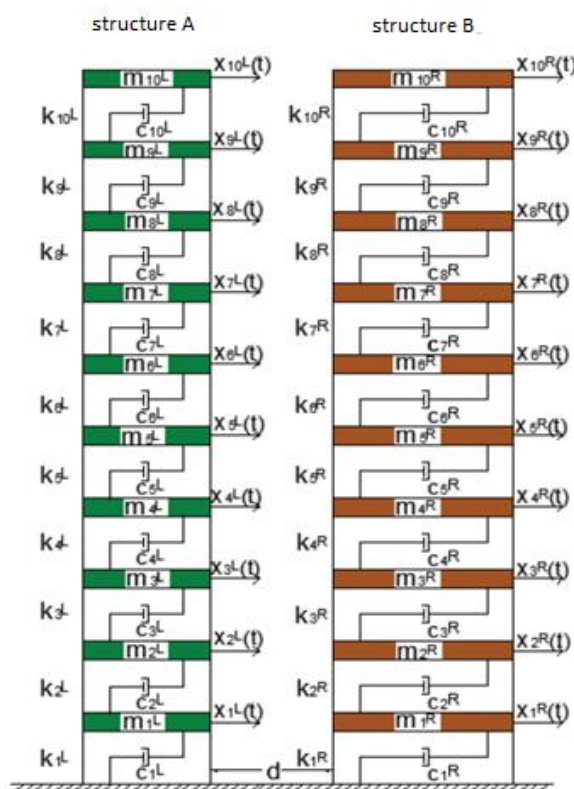
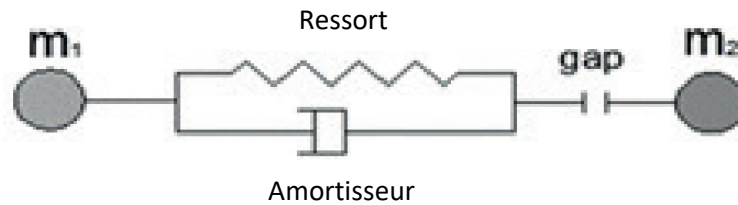


Figure 1.3 : Modèle des deux bâtiments en collision [8]

Pour minimiser le risque de collision, le modèle viscoélastique linéaire a été largement et avec succès utilisé dans la plupart des études portant sur les collisions structurelles provoquées par les séismes, en raison de son efficacité et de sa praticité pour simuler la force de collision tout en prenant en compte la dissipation d'énergie associée [8].

Toutefois, un inconvénient de ce modèle est la présence d'une force d'impact négative juste avant la séparation des structures en collision. Pour remédier à ce problème, [9] ont proposé une modification du modèle viscoélastique linéaire, consistant à activer le terme d'amortissement uniquement pendant la phase d'approche de la collision.



**Figure 1.4** : Modèle de la force de collision [9].

L'analyse du comportement d'une structure soumise à une charge sismique décrit la modification du mouvement du sol pendant un séisme en raison de la présence de la structure, ou la modification du mouvement de la structure pendant un séisme en raison de la présence du sol. L'importance de cette interaction varie en fonction de la nature du sol, des caractéristiques de la structure et de son mode de fondation. Il est crucial d'étudier la réponse sismique d'une structure en la considérant non pas de manière isolée, mais comme faisant partie intégrante d'un ensemble comprenant le sol et les structures environnantes.

Des observations post-sismiques suggèrent que l'interaction sol-structure peut être défavorable [11]. Des simulations numériques effectuées par Jeremic et al (2004) [12], ont montré que l'interaction sol-structure peut avoir des effets bénéfiques ou nuisibles sur le comportement de la structure, en fonction des caractéristiques du sol et de celles de l'excitation sismique.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence de l'ISS sur la réponse dynamique des structures. Veletsos et al. (1974, 1975) [19] et Bielak (1975) [20] étaient les premiers à proposer des formules pour la détermination de la période fondamentale de structure en considérant la flexibilité de la fondation. Ces formules ont la forme suivante :

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_u} + \frac{kh^2}{k_\theta}} \quad (1.1)$$

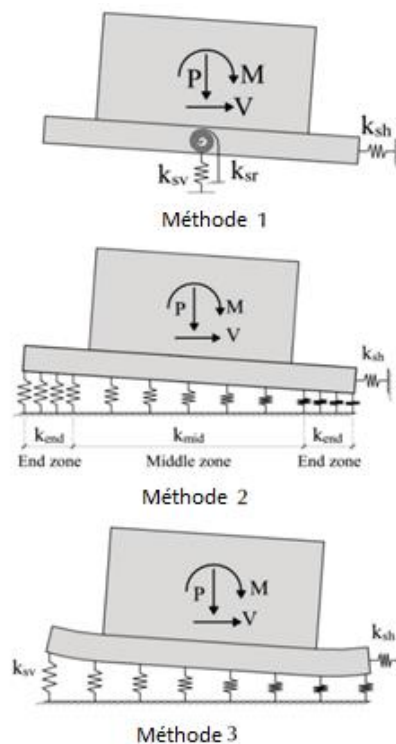
Avec  $k_u$  et  $k_\theta$  sont les rigidités de translation et de rotation des ressorts :  $h$  et  $k$  sont, respectivement, la hauteur et la rigidité à la flexion de la structure :  $\tilde{T}$  et  $T$  sont les périodes fondamentales de la structure avec base flexible et base encastree, respectivement :

La prise en compte des effets de l'ISS est recommandée lorsque le sol de support est flexible (mou ou très mou) contrairement à un sol rigide ces effets sont négligeables.

#### 1.4. Méthodes d'approches de l'ISS

Selon le FEMA [7], il existe trois méthodes d'approches de l'ISS dépendant de la nature des fondations. Comme illustré dans la Figure 1.5, l'interaction sol-fondation pour les fondations rigides peut être représentée par des ressorts individuels pour chaque degré de liberté de la fondation. La première méthode définit des ressorts ponctuels, modélisant chaque degré de liberté à la base d'une fondation avec des ressorts non couplés. Cette méthode est recommandée pour les fondations considérées comme rigides par rapport au sol.

La deuxième méthode définit des ressorts distribués représentant le support du sol comme un milieu continu discrétisé avec les ressorts à chaque extrémité de la semelle renforcés en rigidité. Cette approche est recommandée pour les procédures non linéaires où le couplage explicite de la rigidité axiale et rotationnelle est modélisé avec des ressorts non linéaires. La troisième méthode 3 définit des ressorts distribués représentant le support du sol comme un milieu continu discrétisé avec une valeur uniforme pour les ressorts le long de la longueur de la semelle. Cette méthode est mieux utilisée lorsque la flexibilité des éléments structuraux de la fondation est modélisée de manière explicite.



**Figure 1.5 :** Méthodes d'approche et de modélisation de la fondation avec des ressorts verticaux et rotationnels, telles que présentées dans l'ASCE/SEI 41 du FEMA (2020) [7].

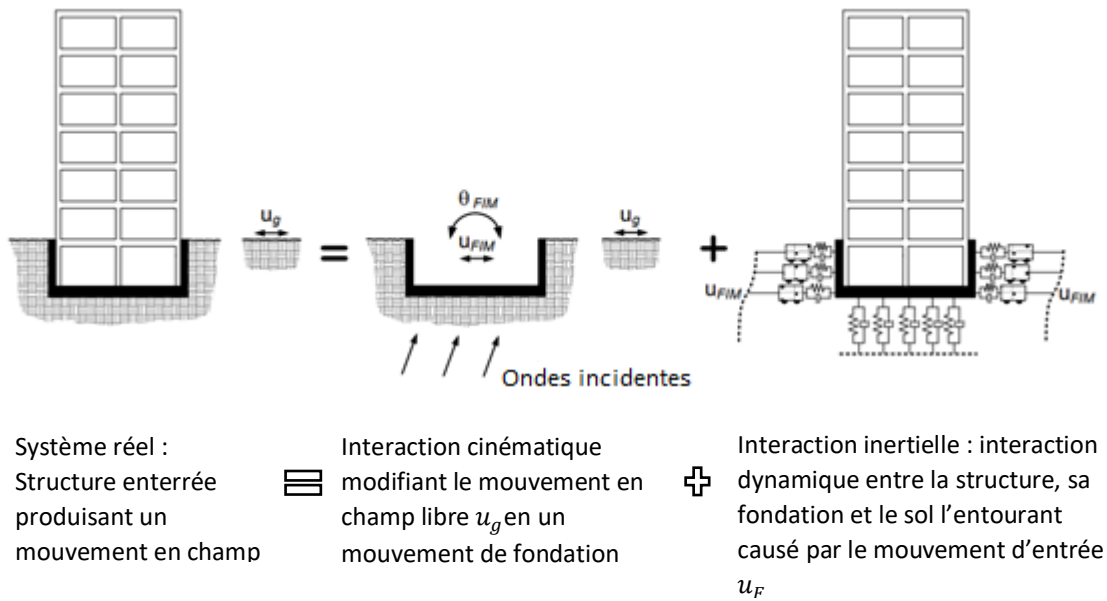
## 1.5.Type de l'interaction sol-structure

Dans la Partie 2 du FEMA P-750, Recommandations sismiques pour les nouveaux bâtiments et autres structures (FEMA) [22], les effets de l'ISS sont catégorisés en tant qu'effets d'interaction inertielle, effets d'interaction cinématique et effets de flexibilité sol-fondation. Les termes d'interaction cinématique et inertielle ont été introduits en 1975 par Robert Whitman [13]. Ces effets sont, d'une part, liés à la rigidité et l'amortissement de la fondation. L'inertie développée dans une structure vibrante donne lieu à une force de cisaillement de base, à un moment et à une torsion. Ces forces génèrent des déplacements et des rotations à l'interface sol-fondation. Ces déplacements et rotations ne sont possibles que grâce à la flexibilité du système sol-fondation, qui contribue de manière significative à la flexibilité structurelle globale (et augmente la période du bâtiment) [13].

De plus, ces déplacements donnent lieu à une dissipation d'énergie via l'amortissement par rayonnement et l'amortissement hystérétique du sol, ce qui peut affecter significativement l'amortissement global du système. Comme ces effets sont enracinés dans l'inertie structurelle, ils sont appelés effets d'interaction inertielle [13].

Les mouvements d'entrée (excitateurs) et les mouvements en champ libre peuvent différer en raison de la rigidité de la fondation, de la propagation des ondes et des effets d'enterrement en l'absence d'inertie de structure et de fondation ; et les déplacements et rotations relatifs entre la fondation et le sol associés à l'inertie de la structure et de la fondation (Figure 1.6) [13].

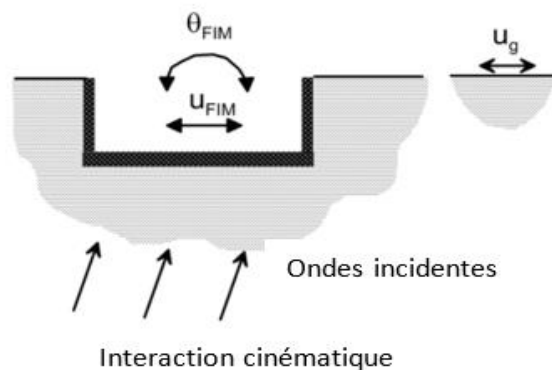
Les déformations flexionnelles, axiales et de cisaillement des éléments de fondation structuraux se produisent en raison des forces et des déplacements appliqués par la superstructure et le milieu du sol. Ils représentent les demandes sismiques pour lesquelles les composants de la fondation doivent être conçus et ils peuvent être significatifs, en particulier pour des fondations flexibles telles que les radier et les pieux [13].



**Figure 1.6:** Illustration du mouvement en champ libre et de sa relation avec l'interaction cinématique et l'interaction inertielle (modifiée à partir de la Figure 1-2) [6]

### 1.5.1. Interaction cinématique

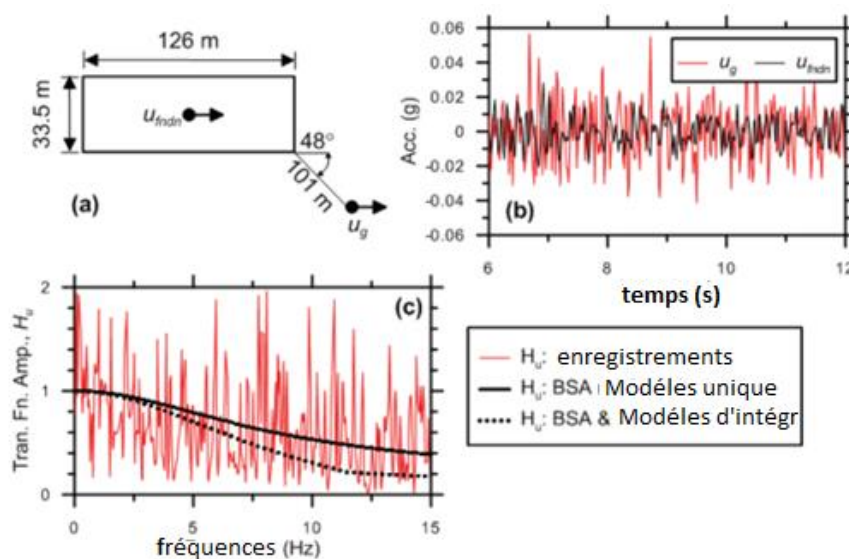
L'interaction cinématique désigne la modification du champ d'ondes incident (mouvement en champ libre) en raison de la présence de la fondation. Cette modification prend en compte la forme et la rigidité de la fondation, tout en supposant que sa masse est négligeable. Cette forme d'interaction revêt une importance significative pour les structures rigides enterrées dans un sol meuble, mais elle peut être négligée pour les structures dotées de fondations superficielles. L'interaction cinématique résulte de la présence d'éléments de fondation rigides sur ou dans le sol, ce qui entraîne des mouvements à la fondation qui diffèrent des mouvements en champ libre. Une cause d'écart est les effets d'enterrement dans lesquels les mouvements au niveau de la fondation sont réduits en raison de la réduction des mouvements du sol avec la profondeur sous la surface libre. [6]



**Figure 1.7 :** Illustration de l'interaction cinématique [6]

Si la dalle de base d'un bâtiment est enterrée sous la surface du sol (c'est-à-dire, la structure possède un sous-sol), les mouvements au niveau de la fondation sont encore réduits en raison de la réduction des mouvements du sol avec la profondeur sous la surface libre. [6]

Pour illustrer l'importance de l'interaction cinématique, des fonctions de transfert peuvent être calculées à partir des mouvements enregistrés lors d'un séisme comme c'est le cas du séisme de Whittier de 1987 au bâtiment du Ranch Cucamonga Law and Justice Center (Programme d'instrumentation des mouvements forts de Californie, CSMIP, Station numéro 23497). Les résultats sont présentés dans la Figure 1.8. [6]

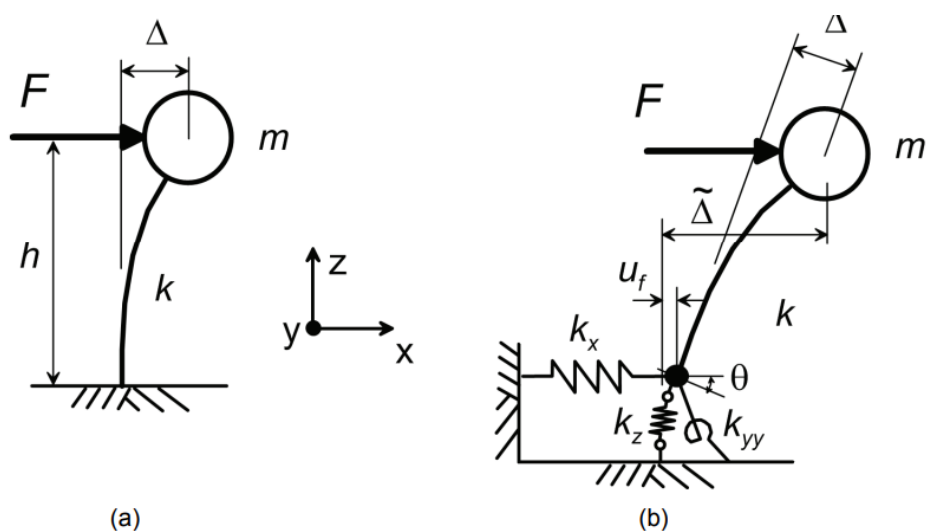


**Figure 1.8 :** (a) plan de localisation de la fondation et du capteur ; (b) historiques temporels de l'accélération ; et (c) fonctions de transfert observées [6]

### 1.5.2. Interaction inertielle

L'inertie développée dans une structure vibrante donne naissance à des forces de cisaillement à la base ainsi que des moments de torsion. Ces forces génèrent des déplacements et des rotations à l'interface sol-fondation. Ces déplacements et rotations ne sont possibles que grâce à la flexibilité du système sol-fondation, ce qui contribue significativement à la flexibilité globale de la structure (et augmente la période du bâtiment). De plus, ces déplacements donnent lieu à une dissipation d'énergie via l'amortissement par rayonnement et l'amortissement hystérétique du sol, ce qui peut affecter significativement l'amortissement global du système. Étant donné que ces effets sont enracinés dans l'inertie structurelle, ils sont appelés effets d'interaction inertielle. [6]

L'interaction inertielle englobe les impacts des forces d'inertie liées au mouvement résultant de la prise en compte de l'interaction cinématique, en considérant les masses réelles de la fondation et des superstructures. [6]

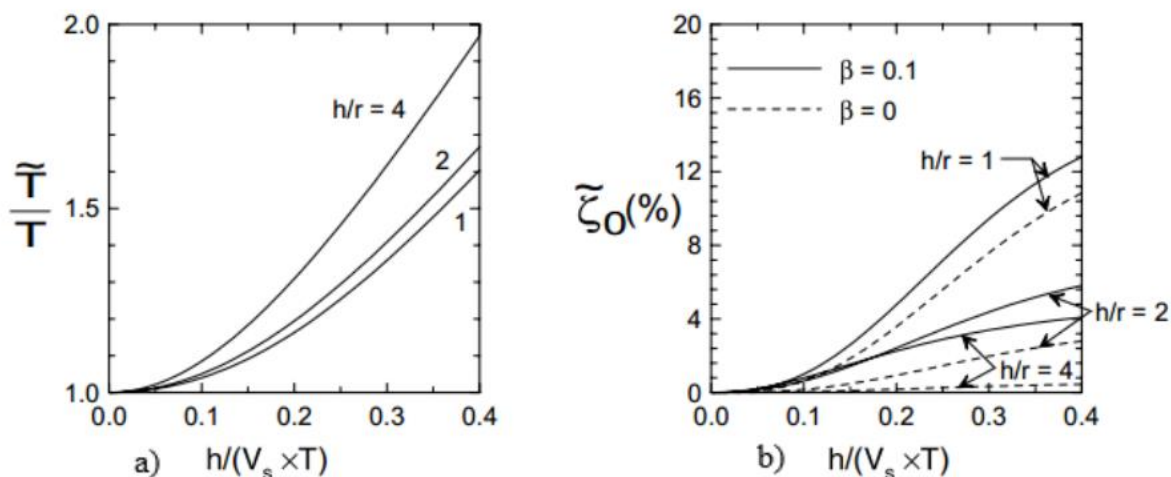


**Figure 1-9 :** Illustration schématique des déformations causées par une force appliquée à : (a) une structure à base fixe, (b) une structure avec flexibilité verticale, horizontale et rotationnelle à sa base [6]

### 1.6. Facteurs qui influencent la réponse des structures face à une sollicitation sismique [7] :

La réponse des structures face à une sollicitation sismique dépend de plusieurs facteurs. Elle est influencée par une combinaison complexe de facteurs géologiques, géographiques, structuraux et de conception.

- (i) **Caractéristiques du sol :** La nature et les propriétés du sol sur lequel la structure est construite ont un impact significatif sur sa réponse aux tremblements de terre. Les sols souples ont tendance à amplifier les mouvements sismiques, tandis que les sols durs peuvent atténuer les vibrations.
- (ii) **Conception et rigidité de la structure :** La manière dont la structure est conçue, notamment sa rigidité et sa résistance aux forces sismiques, influence sa capacité à résister aux tremblements de terre. Les structures conçues pour être flexibles et capables de dissiper l'énergie sismique peuvent mieux absorber l'énergie véhiculée par les secousses sismiques.
- (iii) **Hauteur et forme de la structure :** La hauteur et la forme d'une structure peuvent affecter sa réponse sismique. Les structures plus hautes ont tendance à subir des déformations plus importantes et peuvent être plus sujettes à des phénomènes tels que le balancement et la torsion.



**Figure 1-10** : Impact de la hauteur sur (a) l'allongement de la période et (b) l'amortissement pour différents niveaux de flexibilité dans le sol [7].

(iv) **Interactions sol-structure** : L'interaction entre la structure et le sol sur lequel elle repose peut modifier la façon dont la structure répond aux tremblements de terre. Des facteurs tels que l'amplification du mouvement du sol et la propagation des ondes sismiques à travers le sol peuvent influencer la réponse de la structure.

(v) **Qualité de la construction et de l'entretien** : La qualité de la construction et de l'entretien de la structure joue un rôle crucial dans sa capacité à résister aux tremblements de terre. Les structures bien construites et entretenues sont plus susceptibles de survivre à un séisme avec des dommages minimales.

### 1.7. Effets de l'ISS sur la performance des structures [7] :

Parmi les effets de l'ISS sur la performance sismique d'une structure, on peut citer les effets suivants.

(i) Un allongement de la période de vibration fondamentale de la structure (Figure 1.11).

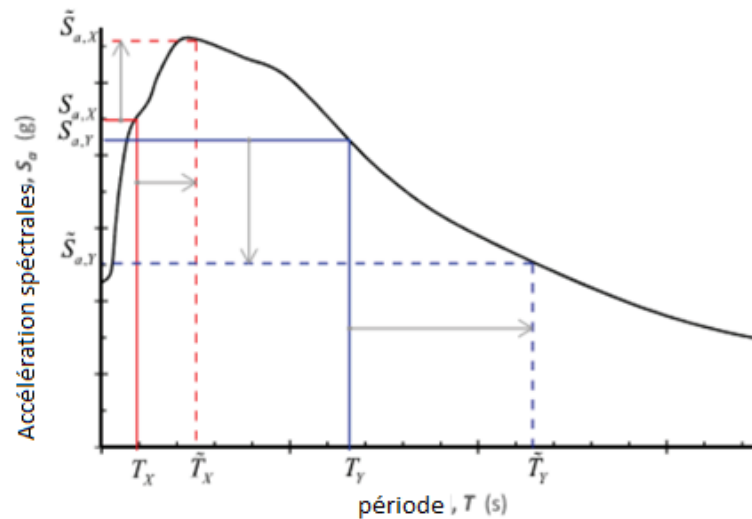


Figure 1-11 : Allongement de la période fondamentale [7]

- (ii) Création d'un amortissement de la fondation, qui est un effet de l'interaction inertielle. Il existe deux contributeurs à l'amortissement de la fondation : l'amortissement du sol et l'amortissement par rayonnement
- (iii) La rotation de la fondation peut influencer considérablement le calcul des déformations modales et, par conséquent, la distribution des accélérations le long de la hauteur du bâtiment.

### 1.8. Synthèse de travaux antérieurs sur le comportement sismique des structures voisines en tenant compte de l'ISS

Madani et al. (2015) [14] ont fait une étude exhaustive sur les effets du martèlement et de l'interaction structure-sol-structure sur le comportement dynamique non linéaire des structures adjacentes. Ils ont adopté un modèle schématisé sur la Figure 1.12.

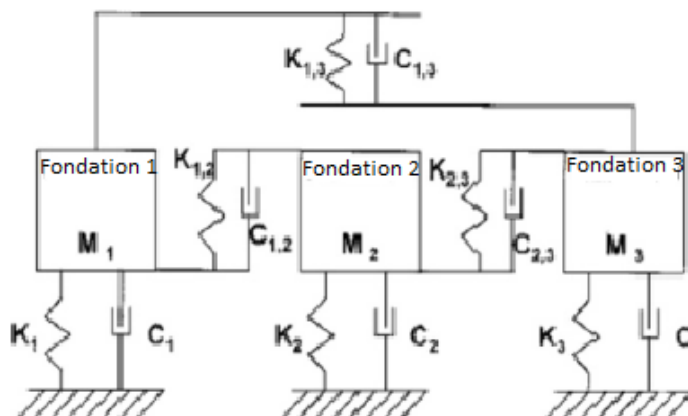
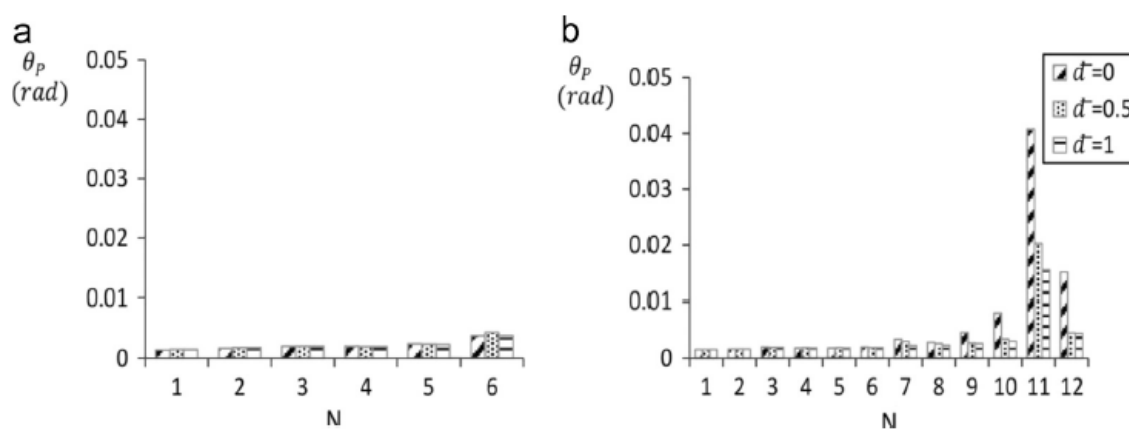


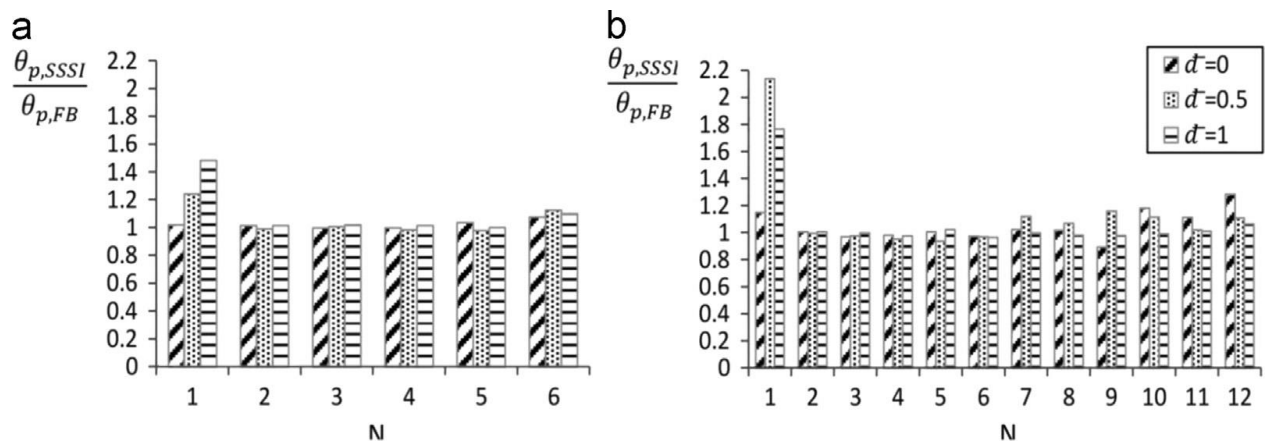
Figure 1.12 : Modèle discret d'interaction sol-fondation-structures [7]

Différents cas de structures adjacentes ont été considérés, notamment des bâtiments de 3 et 5 étages, 3 et 12 étages, 5 et 6 étages, 5 et 12 étages, et 6 et 12 étages, avec des distances de 0%, 50% et 100% de la distance libre requise par les règlements parasismiques. Les structures et le sol sous-jacent ont été modélisés de manière non linéaire. Pour le sol, un modèle de poutre sur fondation Winkler non linéaire (BNWF) avec des ressorts de compression uniquement non linéaires et des amortisseurs visqueux a été utilisé. Des ensembles de 7 enregistrements sismiques ont été sélectionnés pour chaque paire de bâtiments et mis à l'échelle en utilisant un spectre de conception et la procédure du spectre moyen conditionnel. Les réponses maximales ont été calculées à la fois pour les cas de base rigide et flexible afin de détecter les effets de l'interaction à travers le sol.

Il a été conclu que la flexibilité du sol avait souvent un effet augmentant considérable sur la résultante des forces de martèlement et provoquait le martèlement même à des distances bien plus grandes que celles prescrites par les codes sismiques. Les étages où le martèlement se produisait étaient presque les mêmes dans les cas de base flexible et rigide. À de plus grandes distances, le martèlement ne se produisait qu'aux étages supérieurs. Presque aucun martèlement ne se produisait à la distance libre prescrite par le code. Le martèlement a été reconnu comme le principal facteur, par rapport à l'interaction structure-sol-structure, pour l'augmentation des déplacements inter-étages et des déplacements latéraux, en particulier dans le bâtiment le plus grand juste au-dessus du bâtiment plus court adjacent. L'effet le plus intensif du martèlement et de l'interaction structure-sol-structure a été reconnu comme étant l'augmentation de la rotation des rotules plastiques, ou des dommages sismiques, des poutres et des poteaux des deux bâtiments, en particulier dans le bâtiment le plus grand à son premier étage (Figure 1.13). Le martèlement avait une part beaucoup plus importante que l'interaction structure-sol-structure.

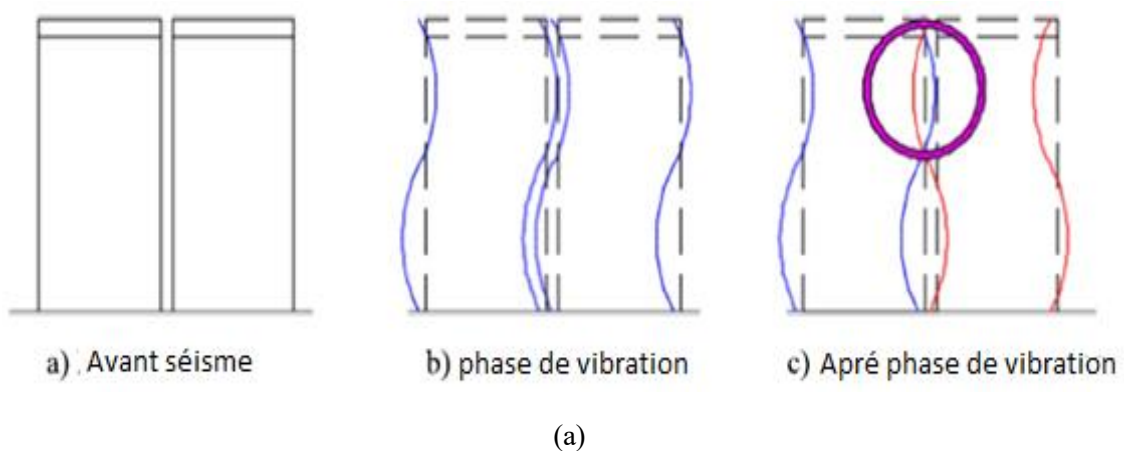


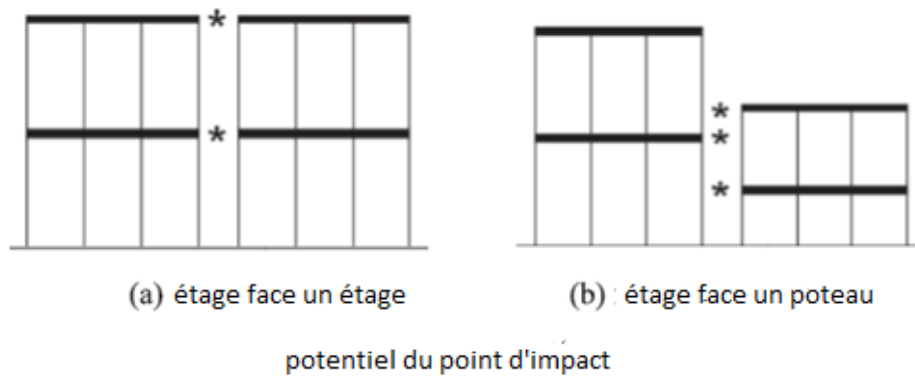
**Figure 1.13:** Valeurs maximales moyennes de la somme des rotations plastiques absolues des poteaux de chaque étage pour le cas de base fixe. (a) Bâtiment de 6 étages, (b) bâtiment de 12 étages [14]



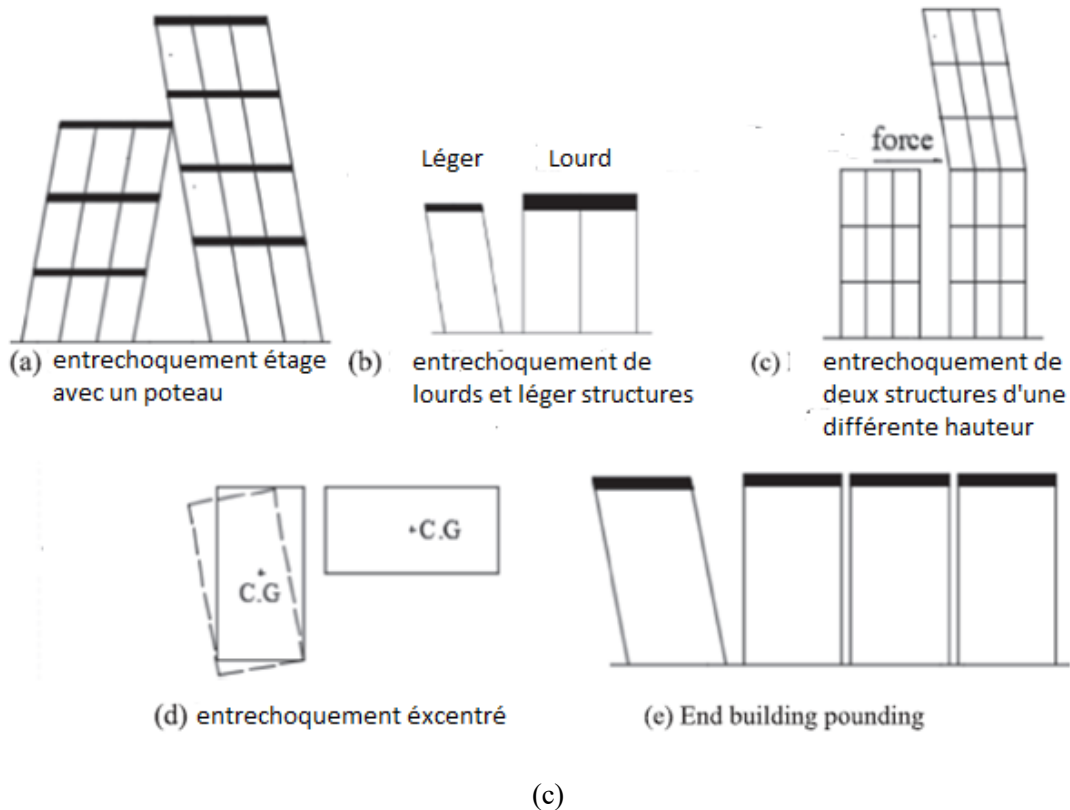
**Figure 1.14 :** Rapport des valeurs maximales moyennes de la somme des rotations plastiques absolues des poteaux avec ISS par rapport à ceux sans ISS : (a) Bâtiment de 6 étages, (b) bâtiment de 12 étages [14].

Miari et al. (2019) [9] ont étudiés l'entrechoquement des structures induit par les tremblements de terre, dans le but de mieux comprendre le phénomène d'entrechoquement lui-même et les raisons des résultats contradictoires. L'effet de l'entrechoquement sur les bâtiments à bases fixes, les bâtiments isolés et les bâtiments reposant sur des sols mous est étudié. Ensuite, les aspects d'un espace recommandé suffisant sont considérés. Des mesures d'atténuation appropriées sont également abordées et des orientations pour les futures études de recherche sur l'entrechoquement des structures sont recommandées. Des comportements de structures adjacentes, différents scénarios d'entrechoquements et différentes configurations d'entrechoquement sont montrés sur les Figures 1.14a, 1.14b et 1.14c, respectivement.





(b) Différents scénarios d'entrechoquements



**Figure 1.15:** Comportement de structures adjacentes, différents scénarios d'entrechoquement, différentes configurations d'entrechoquement [9]

Les recommandations les plus importantes extraites de cette revue sont énumérées ci-dessous :

1. L'effet de la raideur de l'impact et du coefficient de restitution sur la modélisation de l'impact est significatif, alors qu'ils ont été ignorés dans de nombreuses études antérieures. Cela appelle à des études supplémentaires pour quantifier ces paramètres pour différentes configurations de bâtiments en collision.
2. La dispersion dans les résultats des problèmes de l'entrechoquement, lors de l'utilisation de différents modèles de martèlement structural, a été observée dans un certain nombre d'études. Le développement de nouveaux modèles, qui pourraient simuler de manière plus efficace les collisions entre différents types de bâtiments est recommandé.

3. Plusieurs paramètres ont été omis dans l'évaluation du martèlement structurel lors des séismes, par exemple l'effet P-delta, l'angle d'incidence des mouvements du sol, le système structurel, etc. Des études supplémentaires, prenant en compte ces paramètres sont nécessaires.
4. Les formules efficaces conçues pour évaluer l'écart sismique nécessaire pour prévenir le martèlement entre les bâtiments lors de différents mouvements du sol rencontrent certains problèmes. La plupart des formules recommandées surestiment ou sous-estiment l'écart suffisant. Des recherches supplémentaires sur cette question sont nécessaires.
5. Un certain nombre de mesures d'atténuation proposées présentent certains inconvénients, tels que l'espace nécessaire pour les connecteurs d'amortisseur, les dommages aux murs de cisaillement, etc. Des recherches futures pour surmonter ces difficultés sont suggérées.
6. Différents types d'analyses, tels que la simulation de Monte Carlo, ont été menés pour étudier les paramètres dynamiques les plus influents sur le martèlement structurel en utilisant des systèmes à un degré de liberté. La vérification des résultats pour les systèmes à plusieurs degrés de liberté est nécessaire.

Chinmayi (2019) [15] a présenté une étude détaillée sur le martèlement des structures avec des effets d'interaction entre le sol et la structure en tenant compte des travaux réalisés par de nombreux chercheurs comme référence.

Il a montré que le phénomène de martèlement semble être préjudiciable et est plus intense pour les bâtiments plus hauts. De plus, en tenant compte de l'effet du sol, cela amplifie le martèlement davantage. Par conséquent, le martèlement entre les bâtiments adjacents en tenant compte de l'interaction sol-structure est d'une importance vitale pour la durabilité. Le phénomène de martèlement en tenant compte de l'effet de l'interaction structure-sol modifie les réponses dynamiques des bâtiments adjacents.

Les bâtiments vibrent généralement avec des amplitudes plus élevées et des fréquences plus basses. Il y a également une augmentation d'autres réponses sismiques telles que l'effort tranchant à la base et le déplacement latéral de la structure en raison de l'interaction, et cela dépend de la distance entre deux bâtiments adjacents. Le martèlement dégrade l'état du bâtiment car les réponses sismiques sont amplifiées après le martèlement.

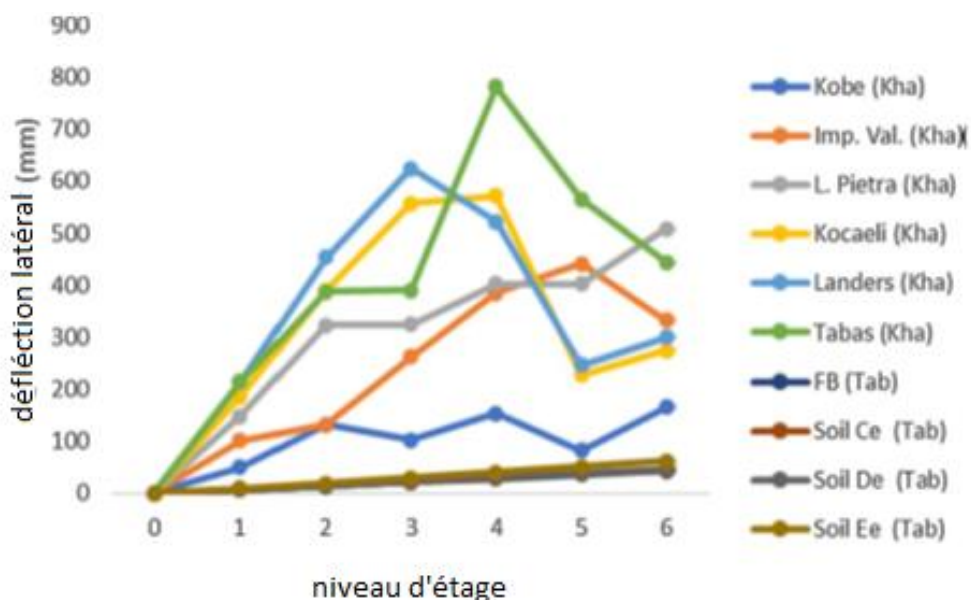
Les bâtiments d'angle connaissent toujours des augmentations significatives de leur réponse par rapport aux structures intérieures. L'effet de martèlement est plus prononcé lorsque les différences de masses entre deux structures adjacentes sont énormes.

Pour éviter les dommages aux bâtiments adjacents pendant le séisme, il est nécessaire de fournir la séparation adéquate ainsi qu'une conception et une réalisation appropriées. La procédure de conception existante doit tenir compte de l'impact dynamique. Le rapport de période entre bâtiments adjacents doit être soigneusement sélectionné pour réduire les effets de martèlement

Sobhi et Far (2021) [16] ont tenté de mener une revue et une comparaison complètes (Figure 1.15) des études passées et actuelles avec et sans effet d'interaction sol-structure pour montrer l'importance de l'SSI sur l'impact structural et donc la nécessité d'une nouvelle approche de conception sismique en tenant compte des influences néfastes de l'ISS sur les structures, en particulier sur les bâtiments adjacents à proximité les uns des autres. Les déplacements et les

déformations inter-étages sont comparés aux prévisions futures pour mieux comprendre l'effet de l'impact sur ces bâtiments et améliorer ensuite la conception pour atténuer l'impact.

Elle vise à démontrer l'importance de prendre en compte les effets de l'interaction sol-structure sur l'impact structural en comparant des études de cas développées par des chercheurs récents et modernes. Des valeurs plus élevées obtenues dans ces cas lors de la prise en compte de l'ISS et de l'ISSS ont soutenu cette théorie, par rapport à ceux sans effet de l'ISS. Le facteur le plus significatif était la déflexion latérale.



**Figure 1.16:** Comparaison des déformations latérales sous différents séismes [16]

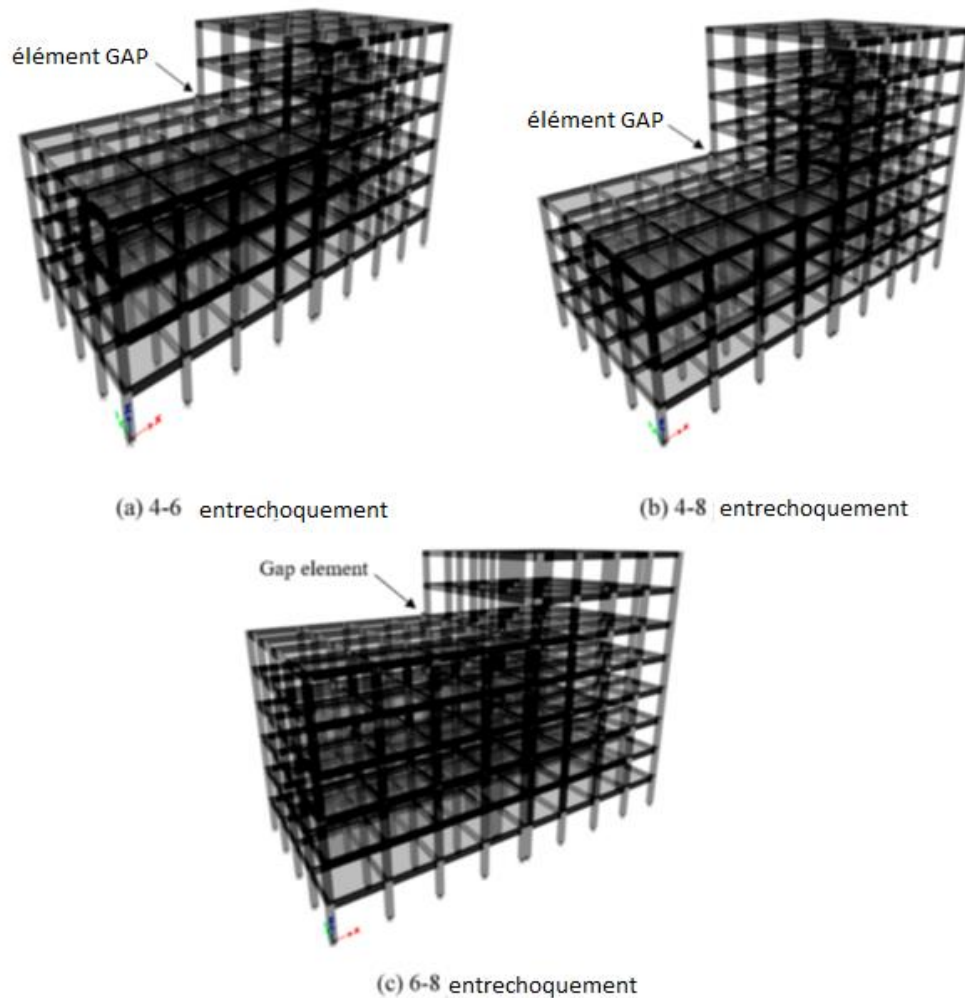
Il a été montré dans cette étude que la déformation augmentait à mesure que le bâtiment devenait plus grand. La proportionnalité variait dans chaque cas avec une plage moyenne de 1 à 2,5.

Cela indique que la force de percussion augmente à un niveau plus élevé et donc que l'ISS peut augmenter l'impact de la percussion dans les bâtiments plus grands que dans les autres, par exemple.

Globalement, l'effet de l'ISS est considéré comme significatif. L'influence directe de l'ISS sur l'impact de la percussion a été clairement établie en mettant en évidence l'effet de l'ISS sur le comportement structural du bâtiment adjacent.

Cela était assez apparent dans environ 86% des cas qui ont montré l'importance de l'inclusion de l'ISS dans l'analyse de l'impact de la percussion. Les résultats de cette étude étaient axés sur la démonstration de l'importance de l'ISS dans l'analyse sismique lors de la percussion de bâtiments adjacents.

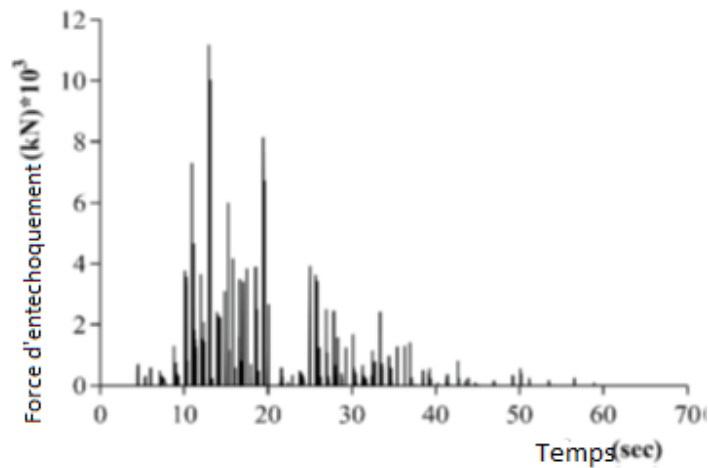
Miari et Jankowski (2022) [9] ont étudié la collision entre bâtiments fondés sur différents types de sols (Figure 1.17).



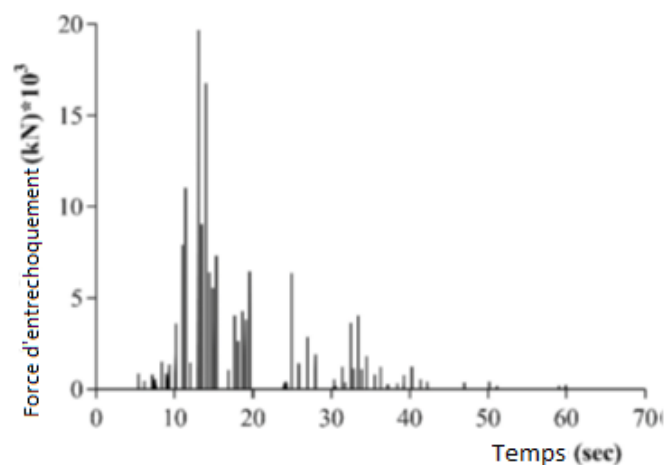
**Figure 1.17:** Scénarios de collision [9]

Cinq types de sols ont été pris en compte, à savoir les types de sols A, B, C, D et E de l'ASCE 7-10 [10]. Les effets de la collision entre les bâtiments fondés sur les mêmes et différents types de sol ont été examinés dans cette étude. Trois structures en 3D de 4, 6 et 8 étages ont été prises en compte. Trois scénarios de collision ont été pris en compte, à savoir la collision entre des bâtiments de 4 étages et de 6 étages, entre des bâtiments de 4 étages et de 8 étages et entre des bâtiments de 6 étages et de 8 étages. Tout d'abord, plusieurs méthodes ont été appliquées pour étudier les effets des paramètres du site sur la réponse des bâtiments exposés aux tremblements de terre, de sorte que les valeurs entraînant des effets significatifs et des réponses plus importantes puissent être prises en compte dans une étude ultérieure sur les interactions structurelles. Ensuite, les effets de la collision entre les bâtiments fondés sur un type de sol spécifié ont été analysés pour ces trois scénarios de collision et comparés au cas sans collision. Enfin, la collision entre des bâtiments de 4 étages et de 8 étages ainsi qu'entre des bâtiments de 6 étages et de 8 étages a été envisagée sous

différents types de sol définis dans le code ASCE 7–10 [10]. Deux scénarios de collision (4-8 et 6-8) ont été considérés et dont les résultats en termes de force d'entrechoquement sont montrés sur la figure 1.17.



(a) Force de collision pour le scénario de collision 4-8



(b) Force de collision pour le scénario de collision 6-8

**Figure 1.18 :** Force de collision pour deux scénarios de collision [17]

Les résultats présentés dans ces figures indiquent que les bâtiments ont connu des réponses structurelles sensiblement différentes selon les conditions du site. Les niveaux de déplacement les plus importants ont été obtenus dans le cas des bâtiments fondés sur le type de sol E, puis D, puis C, puis B et enfin A. Les déplacements de crête des bâtiments en collision (au niveau du dernier étage du bâtiment le plus court) pour deux scénarios de collision différents. Il est clairement observé à partir du tableau que le plus grand déplacement de crête a été observé également pour les bâtiments fondés sur le type de sol E, puis D, puis C, puis B et enfin A.

Les résultats présentés dans ces figures illustrent que les plus grands déplacements de crête à tous les étages (non seulement au niveau du dernier étage de la structure la plus courte) ont été observés pour le type de sol E, puis D, puis C, puis B et enfin A. Par conséquent, on peut conclure que des écarts sismiques plus importants sont nécessaires pour les bâtiments fondés sur la classe de sol E, puis D, C, puis B et enfin A. Cette conclusion confirme clairement la nécessité de prendre en compte les types de sols dans les futures études axées sur les collisions structurelles induites par les séismes, plutôt que de considérer uniquement les bâtiments à base fixe. En effet, dans les études qui tiennent compte de l'ISS, une attention particulière doit être accordée au type de sol utilisé et non seulement à l'ISS en général.

Pote et Mate (2023) [17] ont analysé trois systèmes linéaires élastiques à degrés de liberté multiples adjacents soumis à des actions sismiques et à des explosions souterraines en considérant les effets de l'ISS et sur des base fixe. Des bâtiments tridimensionnels sont analysés et conçus pour déterminer les dimensions des poteaux et des poutres avec le logiciel SAP2000 en tenant compte de toutes les combinaisons de charges possibles de poids propre, de charge d'exploitation et de charge sismique conformément à la norme IS 1893 :2016 Partie I. La méthode indirecte est utilisée pour étudier l'effet de l'interaction sol-structure. Les rigidités des ressorts d l'ISS et les constantes d'amortissement sont calculées conformément à la norme FEMA 356. Ces bâtiments sont convertis en modèle de masse concentrée selon les principes de la dynamique des structures. L'ensemble de l'analyse des trois modèles de masse concentrée adjacents avec une séparation insuffisante est réalisée dans le domaine temporel dans l'environnement MATLAB. Les résultats sont obtenus en termes déplacement du dernier étage, de la force d'entrechoquement au niveau du dernier étage et de la force de cisaillement à la base. À partir des résultats, on constate que l'ISS amplifie la réponse en déplacement du bâtiment par rapport au système à base fixe. L'ISS surestime également la réponse d'entrechoquement de la structure. La réponse à la force d'explosion est beaucoup plus lissée que la réponse sismique de la structure. Il a été conclu que :

(1) L'ISS amplifie la réponse en déplacement du bâtiment de 6 % à 8 % par rapport au système à base fixe pour le cas considéré de chargement sismique. Cependant, en cas de chargement par explosion en subsurface, l'ISS amplifie la réponse en déplacement d'environ 2,2 % par rapport au système à base fixe.

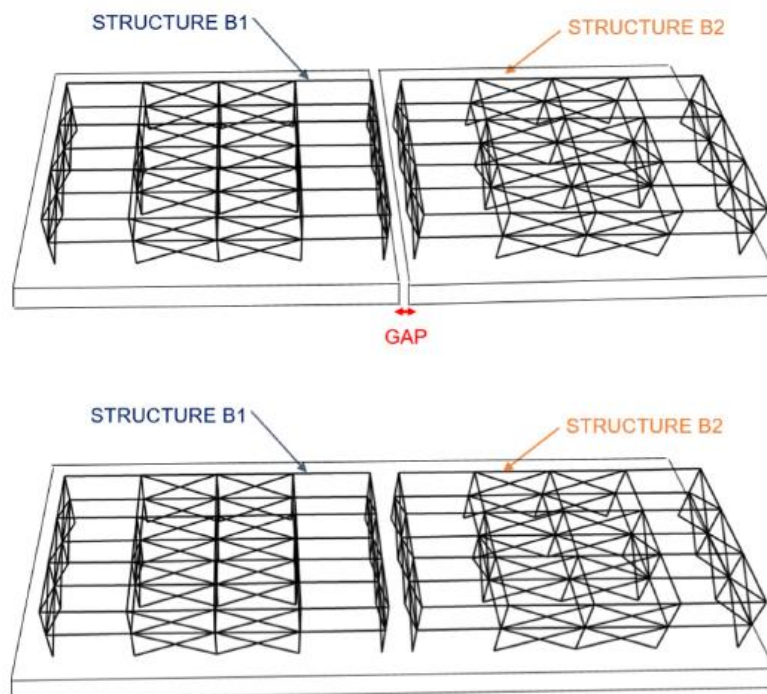
(2) En cas de mouvement du sol de longue durée tel que des excitations sismiques, le système du modèle à plusieurs degrés de liberté (PDDL) avec ISS surestime la réponse de collision de 35 % par rapport au système à base fixe. Cependant, pour un chargement impulsionnel de courte durée, le système à base fixe surestime la réponse de collision de 14 % par rapport au système

ISS. Ainsi, les tendances de ces résultats non similaires sont produites entre les mouvements de sol de courte et de longue durée sous ISS en ce qui concerne les forces de collision.

(3) Les valeurs de force de cisaillement de base diminuent jusqu'à 10 % dans le système de poutre à PDDL avec ISS par rapport au système à PDDL à base fixe, à la fois en mouvements de sol en subsurface et sismiques.

(4) L'explosion produit une réponse temporelle plus lisse que pour le chargement sismique, où la réponse est beaucoup plus erratique. La réponse sismique se dissipe très facilement après l'événement, mais ce n'est pas le cas avec l'explosion, qui prend plus de temps à dissiper le mouvement.

El Hosney et al. (2024) [18] ont étudié le rôle de la discontinuité de la fondation et des caractéristiques dynamiques différentes sur les effets de collision entre les bâtiments de faible hauteur. Les bâtiments sont constitués de plusieurs structures en béton armé (avec des poteaux verticaux et des murs de contreventement) présentant différentes caractéristiques dynamiques sous l'effet de l'ISS (la période fondamentale du premier bâtiment est maintenue constante à 0,18 s, tandis que la période du deuxième bâtiment variait de 0,18 s à 0,36 s). La figure 1.19 montre les structures sélectionnées.



**Figure 1.19:** Structures sélectionnées avec deux schémas de fondation (avec GAP et sans, GAP) [19]

Deux schémas de fondation (GAP, sans GAP) ont été pris en compte sous 7 mouvements d'entrée. Un total de 56 analyses dynamiques non linéaires a été réalisées en appliquant le logiciel

Opensees pour représenter la déformabilité du sol et, par conséquent, les effets non linéaires de l'interaction sol-structure (ISS). À cet égard, l'interface entre le sol et la fondation a été modélisée avec une attention particulière pour évaluer les réponses réalistes de l'ensemble du système.

Les effets de collision entre les dalles de fondation dans le cas de la fondation avec espace ont été montrés pour augmenter les déformations des structures. La présence d'une fondation continue a été démontrée pour éviter la collision entre les fondations et, ainsi, la transmission des déformations aux superstructures. En particulier, les forces de collision provoquent des déformations significatives dans le sol, qui interagissent avec les superstructures.

Selon [EL Hoseney et al. \(2024\)](#) [18], la performance de l'ensemble du système (sol-fondation-structure) dépend de la flexibilité structurelle. Par conséquent, une solution pratique pour réduire le risque de collision peut consister à relier les fondations adjacentes avec des jonctions rigides, en particulier pour les bâtiments existants et historiques.

## **1.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons tenté de présenter de manière succincte les deux éléments clés de ce projet de fin d'études : l'entrechoquement entre structures adjacentes et le phénomène d'interaction sol-structure. La deuxième partie a été consacrée à une synthèse brève des travaux antérieurs sur ces deux problématiques.

## Chapitre 2

---

*Présentation de l'ouvrage de référence*

---

## 2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier le comportement linéaire de l'ouvrage de référence constitué de deux structures à portique contreventés par voiles en béton armé à neuf niveaux, avec remplissage en maçonnerie rigide, implantée dans la zone III selon Règles Parasismiques Algériennes (RPA99/Version 2003). Les éléments (voiles, poteaux poutres) des deux structures sont dimensionnés selon le règlement parasismique Algérien RPA 99/ V2003.

Pour cette étude, nous appliquerons une analyse modale afin d'évaluer la réponse dynamique de l'ouvrage cité précédemment car il est considéré comme un ouvrage témoin ou de référence pour comparer ses résultats avec ceux des structures que nous étudierons dans le cadre de ce projet.

La modélisation numérique sera menée à l'aide du logiciel ETABS V-19. Nous utiliserons l'Excel 2016 pour la présentation des tableaux et figures

## 2.2. Identification de l'ouvrage de référence

Les structures à étudier sont deux bâtiments identiques à usage d'habitation, composée chacune d'un rez-de-chaussée et de neuf niveaux (**RDC+9**) et sont séparées par un joint sismique de type élément GAP. Les deux bâtiments sont symétriques et réguliers. Les bâtiments possèdent cinq travées dans la direction longitudinale (sur l'axe x-x) et trois travées dans la direction transversale suivant l'axe y-y, et de hauteur de chaque niveau uniforme de 3,06m. Il est supposé d'être situé dans une zone sismique III (forte sismicité) selon la classification donnée par les RPA 99 (2003), implanté sur un sol de fondation considérée comme une base parfaitement encastrée.

Les structures seront implantées par la suite sur trois types de sol différents (Sol rocheux S1, sol meuble S3 et sol très meuble S4) tout en tenant compte de l'interaction sol-structure (ISS). L'interaction sol-structure sera modélisée en représentant l'interface de contact avec des ressorts en translation horizontales sur les axes x-x et y-y et un autre en rotation par rapport à l'axe z-z.

Les structures sont dans le groupe d'usage 2, selon le RPA 99 (2003). Le système de contreventement est assuré par des voiles, avec remplissage en maçonnerie rigide. Les caractéristiques des matériaux initialement considérés sont, 30 MPa pour la résistance à la compression du béton  $f_{c28}$ , et 400 MPa pour la limite d'élasticité des armatures  $f_e$ . Les données géométriques nécessaires (voir Figure 2.1) sont les suivantes :

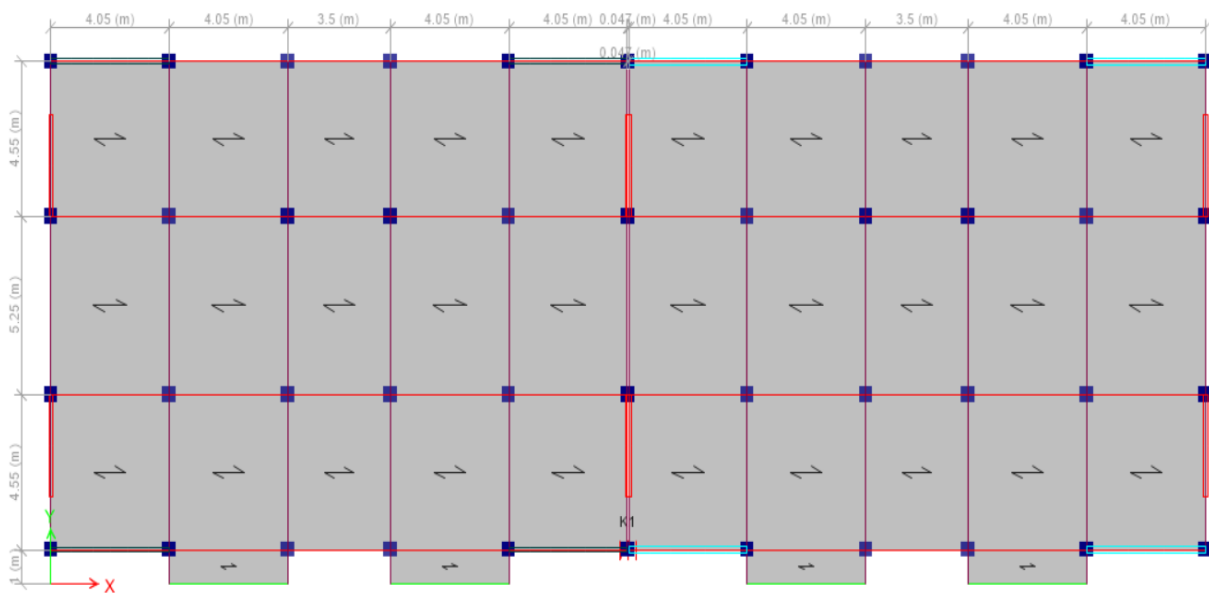
### 2.2.1. Dimensions en plan

Pour la structure (R+9) :

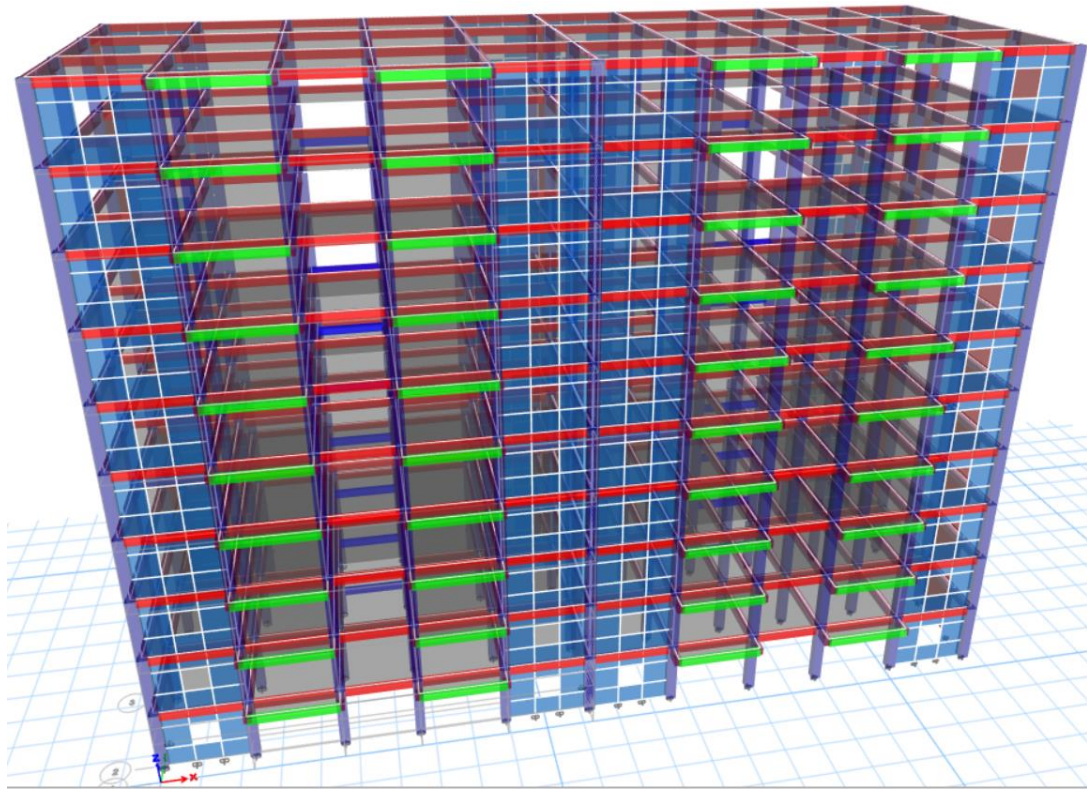
- La largeur totale du bâtiment est de : **14,10m**
- La longueur totale du bâtiment est de : **19,70 m**

### 2.2.2. Dimensions en élévation

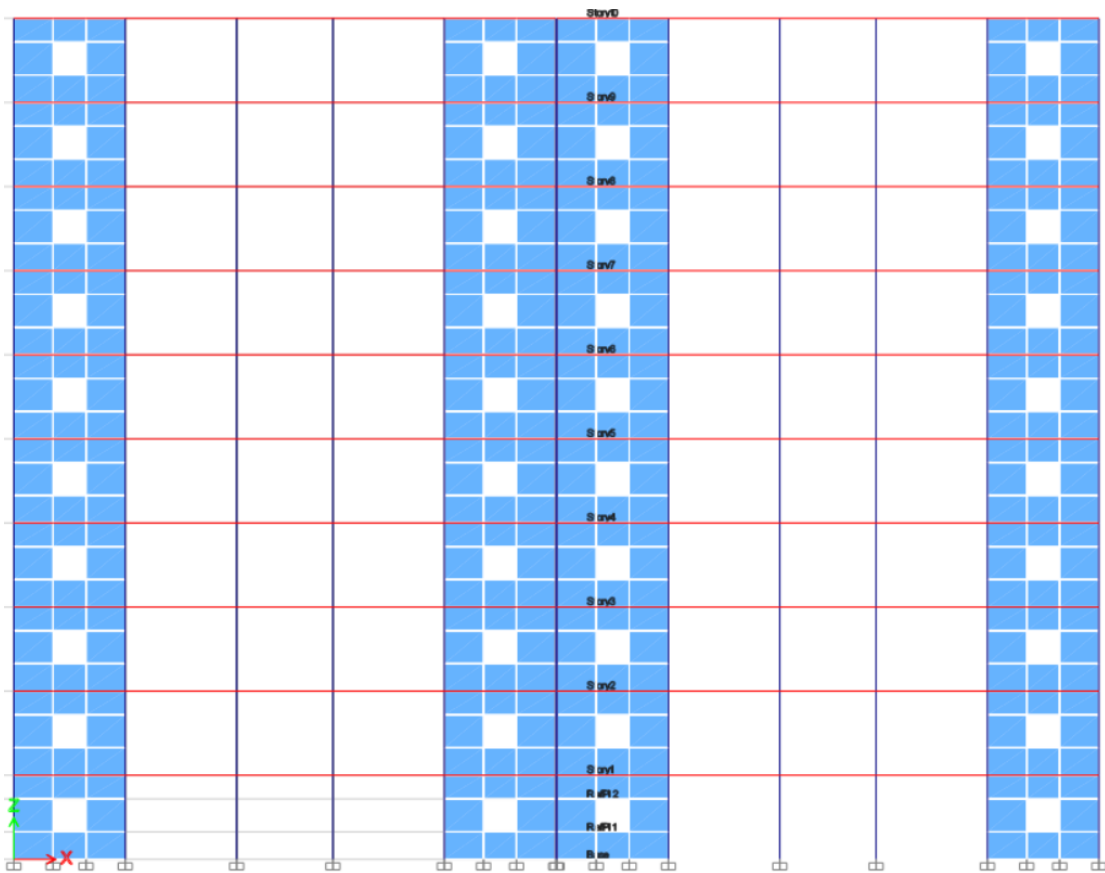
- Hauteur du RDC et première étage : **3,06 m**
- Hauteur de l'étage : **3,06 m**
- Hauteur totale du bâtiment :
- (R+9) => 30.60 m



(a)- Vu en plan



(b)- Vu en 3D



(c)- Vu en élévation

**Figure 2.1** : Géométrie de l'ouvrage étudié.

## 2.3. Caractéristiques des matériaux

### 2.3.1 Béton

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

#### a. Résistance caractéristique du béton à la compression

Le matériau béton est défini par sa valeur de résistance caractéristique en compression à 28 jours exprimé en MPa, pour notre étude on adopte une valeur  $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$ .

#### b. Module de déformation longitudinale « module de Young »

Pour un chargement de durée d'application inférieure à 24 heures, ce module est donné selon l'Art A.2.1, 21, BAEL91/99 par la formule suivante :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj} [MPa]} \quad (2.1)$$

Dans notre étude  $E_{ij} = 34179,558 \text{ MPa}$ .

Pour un chargement de longue durée, ce module est donné selon l'Art.A.2.1, 22, BAEL91/99 par la formule :

$$E_{ij} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj} [MPa]} \quad (2.2)$$

Dans notre étude  $E_{vj} = 10367,54 \text{ Mpa}$ .

#### c. Coefficient de Poisson est donné selon l'Art A.2.1, 3, BAEL91/M 99 comme suit

$\nu = 0$  pour le calcul des sollicitations à l'ELU (béton fissuré),

$\nu = 0,2$  pour le calcul des déformations à l'ELS.

#### d. Les contraintes limites

On distingue deux états limites de calcul selon le règlement **BAEL91/M 99** :

##### ✓ *Contrainte à l'Etat limite ultime de résistance (ELUR)*

La contrainte du béton à l'Etat limite ultime de résistance (ELUR) est définie par :

$$\sigma_b = \frac{0,85 \times f_{c28}}{\theta \times \gamma_b} \quad (2.3)$$

Avec  $\gamma_b = 1,15$  en situations accidentelles et  $\gamma_b = 1,5$  en situations durable.

Dans notre étude,  $\sigma_b = 17$  MPa pour une situation durable et  $\sigma_b = 17$  MPa pour une situation accidentelle.

✓ **Contrainte ultime de cisaillement**

La contrainte ultime de cisaillement est limitée par :  $\tau \leq \bar{\tau}$

Fissuration peut préjudiciable. Déduite de la formule suivante :

$$\bar{\tau}_u = \min \left\{ 0.20 \frac{f_{c28}}{\gamma_b}; 5 \text{ MPa} \right\} \quad (2.4)$$

Fissuration préjudiciable et très préjudiciable. Déduite de la formule suivante :

$$\bar{\tau}_u = \min \left\{ 0.20 \frac{f_{c28}}{\gamma_b}; 5 \text{ MPa} \right\} \quad (2.5)$$

**e. Etat limite de service (ELS)**

La contrainte limite de service en compression du béton est limitée par :

$$\sigma_{bc} \leq \bar{\sigma}_{bc}$$

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0.6 f_{c28}, \text{ pour notre cas } \bar{\sigma}_{bc} = 18 \text{ MPa}$$

**2.3.2. Acier**

Le type d'aciers qui sera éventuellement utilisé dans notre travail pour les armatures longitudinales et transversales est à haute adhérence de nuance FeE400.

**a. Contrainte limite à l'état limite de résistance (ELUR)**

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} \quad (2.6)$$

Avec

$\gamma_s$ : Coefficient de sécurité de l'acier ;

$\gamma_s = 1,15$  cas des situations durables ( $\sigma_s = 348$ MPa) ;

$\gamma_s = 1.00$  cas des situations accidentelles ( $\sigma_s = 400$ MPa).

## b. Contrainte de l'acier à l'état de service (ELS)

Pour les fissurations peu nuisibles : il n'y a pas de vérification à faire ;

Pour les fissurations préjudiciables :  $\overline{\sigma}_s = \min \left( \frac{2}{3} f_e ; \max (0,5 f_e ; 110 \sqrt{\eta \cdot f_{tj}}) \text{MPa} \right)$ ;

Fissurations très préjudiciables :  $\overline{\sigma}_s = 0,8 \xi$ . (MPa).

Avec

$\eta$  : Coefficient de fissuration ;

$\eta=1,00$  pour les aciers ronds lisse ;

$\eta=1,60$  pour les aciers à haute adhérence.

## 2.4. Dimensions des éléments de la structure

Les sections de béton adoptées sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau 2.1** : Données géométriques des éléments de la structure étudiée.

Structure	Type de sol	Zone	Hauteur d'étage H (m)	Épaisseur de voile e (cm)	Section des éléments (cm x cm)				
					Poteau	Poutre SP	Poutre SPN	Poutre de chaînage	Poutre palière
R+9	S1	III	3.06	15	45 x 45	35 x 40	35 x 30	35 x 30	30 x 35

## 2.5. Chargement

Les tableaux ci-dessous montrent les épaisseurs, poids volumique et poids surfacique des différents éléments des différents planchers ainsi que les charges d'exploitation.

**Tableau 2.2** : Épaisseurs, poids volumique et poids surfacique des différents éléments du plancher terrasse

Désignation	Épaisseur (cm)	Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	Poids surfacique (kN/m <sup>2</sup> )
Protection gravier	5	20	1,00
Étanchéité multicouche	2	6	0,12
Isolation thermique	4	4	0,16
Béton en pente 1,5%	10	22	2,20
Dalle compression Corps creux	16 + 4	/	2,85
Enduit de plate	2	10	0,20
Total			6,53

**Tableau 2.3:** Épaisseurs, poids volumique et poids surfacique des différents éléments du plancher courant

Désignation	Épaisseur (cm)	Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	Poids surfacique (kN/m <sup>2</sup> )
carrelage	2	22	0,44
Mortier de pose	3	20	0,60
Sable	2	19	0,38
Cloison de distribution	10	/	1,00
Dalle compression Corps creux	16 + 4	/	2,85
Enduit de plâtre	2	10	0,20
Total			5,10

**Tableau 2.4:** Épaisseurs, poids volumique et poids surfacique des murs extérieurs.

Désignation	Épaisseur (cm)	Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	Poids surfacique (kN/m <sup>2</sup> )
Enduit de plâtre	2	10	0,20
Brique creuse interne	10	9	0,90
Vide	5	/	0,05
Brique creuse externe	15	9	1,35
Enduit de ciment	2	18	0,36
Total			2,85

**Tableau 2.5:** Surcharge exploitation

Élément	Surcharge (kN/m <sup>3</sup> )
Plancher terrasse	1
Plancher étage courant	1,5
Balcon	3,5

## 2.6. Résultats

Dans la présente étude, une comparaison entre les réponses des structures citées ci-dessus sera réalisée. Les paramètres recherchés par la réponse de la structure concernée par cette étude comparative et pour les différents règlements sont :

- Les périodes fondamentales des structures
- Les déplacements des structures
- Force sismique à la base des bâtiments

Le calcul de la force sismique à la base des bâtiments est réalisé en utilisant la méthode statique équivalente en RPA99 (version 2003).

### 2.6.1. Analyse dynamique modale

L'analyse dynamique spectrale est donc une méthode applicable dans le calcul de la réponse linéaire des structures complexes à plusieurs degrés de liberté, dont le principe est basé sur le fait que la réponse n'est que la superposition des réponses individuelles des modes naturels de vibration, où chaque mode a sa propre forme de vibration (le mode propre), sa propre fréquence ou période.

Les paramètres significatifs permettant de représenter le comportement dynamique d'une structure linéaire sont : la période fondamentale, l'effort sismique à la base et le déplacement inter-étage. Le comportement dynamique de la structure sous des conditions d'excitation particulières en l'absence de toute modélisation ne requiert que la seule connaissance de ces paramètres.

### 2.6.2. Modélisation

La modélisation numérique de la structure est faite en éléments finis à l'aide du logiciel ETABS V-19, qui permet à la fois l'analyse statique et l'analyse dynamique (analyse des vibrations libres, analyse modale spectrale...etc.).

Les poteaux et les poutres sont modélisés en utilisant des éléments finis linéaires de type « **frame** » disponibles dans la bibliothèque du logiciel (**Column** pour les poteaux et **Beam** pour les poutres). Des éléments finis surfaciques de type « **Slab** » sont utilisés pour la modélisation des planchers (corps creux et dalles pleines) ainsi que escaliers (volée + palier) et le reste des éléments sont introduit comme un chargement.

Les planchers utilisés sont nervurés et considérés infiniment rigides dans leur plan (diaphragmes horizontaux rigides) par application de contraintes cinématiques en utilisant l'option « **diaphragme** » disponible dans le logiciel. Cette considération permet de réduire sensiblement le nombre de degrés de liberté dynamiques.

### 2.6.3. Vérification dynamique de la structure (R+9)

#### 1) Vérification de la période

Selon le RPA99/2003 on a obtenu les résultats suivants :

$$Ct \times (hn)^{\frac{3}{4}} = 0,05 \times (3,06 \times 10)^{\frac{3}{4}} = 0,651 \text{ s}$$

$$TRPA = \min \quad Tx = 0,09 \times hn / \sqrt{Dx} = 0,62048 \text{ s}$$

$$Ty = 0,09 \times hn / \sqrt{Dy} = 0,7029 \text{ s}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Tx = \min (0,651; 0,62048) = 0,62048 \text{ s} \\ Ty = \min (0,651; 0,7029) = 0,651 \text{ s} \end{array} \right.$$

Bien que l'utilisation des méthodes numériques plus précises soit bénéfique, le règlement exige que la valeur obtenue par de telles méthodes ne doive pas excéder 1,3 fois la valeur de la période déterminée par les formules empiriques, c-à-d

$$T_{ETABS} \leq 1.3 \times T_{RPA}$$

$$T_{re(x)} \leq 1.3 \times 0,62048 = 0.81224 \text{ s}$$

$$T_{re(y)} \leq 1.3 \times 0,651 = 0.8463 \text{ s}$$

En effet,

$$T_{ETABS} = 0.77 \text{ s} < T_{reg} (x) = 0.81224 \text{ s} \text{ Condition vérifiée}$$

$$T_{ETABS} = 0.77 \text{ s} < T_{reg} (y) = 0.8463 \text{ s} \text{ Condition vérifiée}$$

Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 2.6

**Tableau 2.6 :** Nombre de modes à retenir pour la structure R+9.

Mode	Période	% Masse effective X	% Masse effective y	Cumul X	Cumul Y	Direction
1	0,770	0,000	0,724	0	72,36	Translation Sens Y
2	0,717	0,693	0,000	69,29	72,36	Translation Sens X
3	0,486	0,000	0,000	69,29	72,36	Torsion
4	0,210	0,000	0,149	69,29	87,22	Translation Sens Y
5	0,172	0,185	0,000	87,82	87,22	Translation Sens X
6	0,129	0,000	0,000	87,84	87,22	Torsion
7	0,098	0,000	0,057	87,84	92,91	Translation Sens Y
8	0,078	0,062	0,000	94,03	92,91	Translation Sens X

On a la somme des participations (% Masse effective X) et (% Masse effective Y) est supérieur à 90 % dans les 5 premier modes sont suffisants.

## 2) Vérification de l'effort tranchant (V)

On a

$$V_{Etabs} \geq 0,8V$$

$$V = \frac{(A.D.Q)}{R} . W \quad A = 0.25; \quad R = 4 \quad ; \quad Q = 1.2; \quad W = 2942437 \times 9.81 = 28865,3 \text{ kN}$$

**Selon la direction (x) :**

$$V_x = 0.8 \times \frac{A \times D \times Q}{R} . W$$

$$\left. \begin{array}{l} T_x = 0,717s \\ T_2 = 0,3 \text{ s} \end{array} \right\} 0 < T_x = 0,245 < 0,3s \dots\dots\dots (CNV)$$

Donc :

$$D_x = 2,5\eta \left( \frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Avec } \eta = \sqrt{\left( \frac{7}{2+10} \right)} \geq 0.7 \quad \Rightarrow \quad \eta = 0,763, \quad D_x = 1,063$$

$$V_x = 1841,02 \text{ kN}$$

**Selon la direction (y)**

$$\eta = 0,82$$

$$\left. \begin{array}{l} T_y = 0,77s \\ T_2 = 0,3 \text{ s} \end{array} \right\} 0 < T_y = 0,77 < 0,3s$$

$$D_y = 2,5\eta \left( \frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} = 1.093$$

$$V_y = 1887,79 \text{ Kn}$$

La vérification de l'effort tranchant est montrée sur le tableau 3.7.

**Tableau 2.7:** Vérification de l'effort tranchant pour la structure R+9

Axes	F1	F2	$V_{Etabs}$ (kN)	$V_{RPA} = 0,8 \times V$ (kN)	Vérification
X	2289,1356	0,0004	2289,135	1472,816	Condition vérifiée
Y	0,0001	2579,4094	2579,409	1510,232	Condition vérifiée

3) **Vérification du déplacement:**

La vérification selon l'axe (X) est montrée sur le tableau 2.8

**Tableau 2.8:** Vérification du déplacement selon X pour la structure R+9

Niveaux	Diaphragmes	UX (m)	$He \times 0.01$ (m)	$\delta_{ek} = ux \times R$	$\Delta = \delta_{ek} - \delta_{ek-1}$	Vérification $\Delta < 0,01 He$
10	D10	0.0160	0.0306	0.0560	0.0063	C.V
9	D9	0.0142	0.0306	0.0497	0.0067	C.V
8	D8	0.0123	0.0306	0.0431	0.0070	C.V
7	D7	0.0103	0.0306	0.0361	0.0070	C.V
6	D6	0.0083	0.0306	0.0291	0.0070	C.V
5	D5	0.0063	0.0306	0.0221	0.0063	C.V
4	D4	0.0045	0.0306	0.0158	0.0056	C.V
3	D3	0.0029	0.0306	0.0102	0.0046	C.V
2	D2	0.0016	0.0306	0.0056	0.0039	C.V
1	D1	0.0005	0.0306	0.0018	0.0018	C.V

$He = 3,06$  m

La vérification selon l'axe (Y) est montrée sur le tableau 2.9

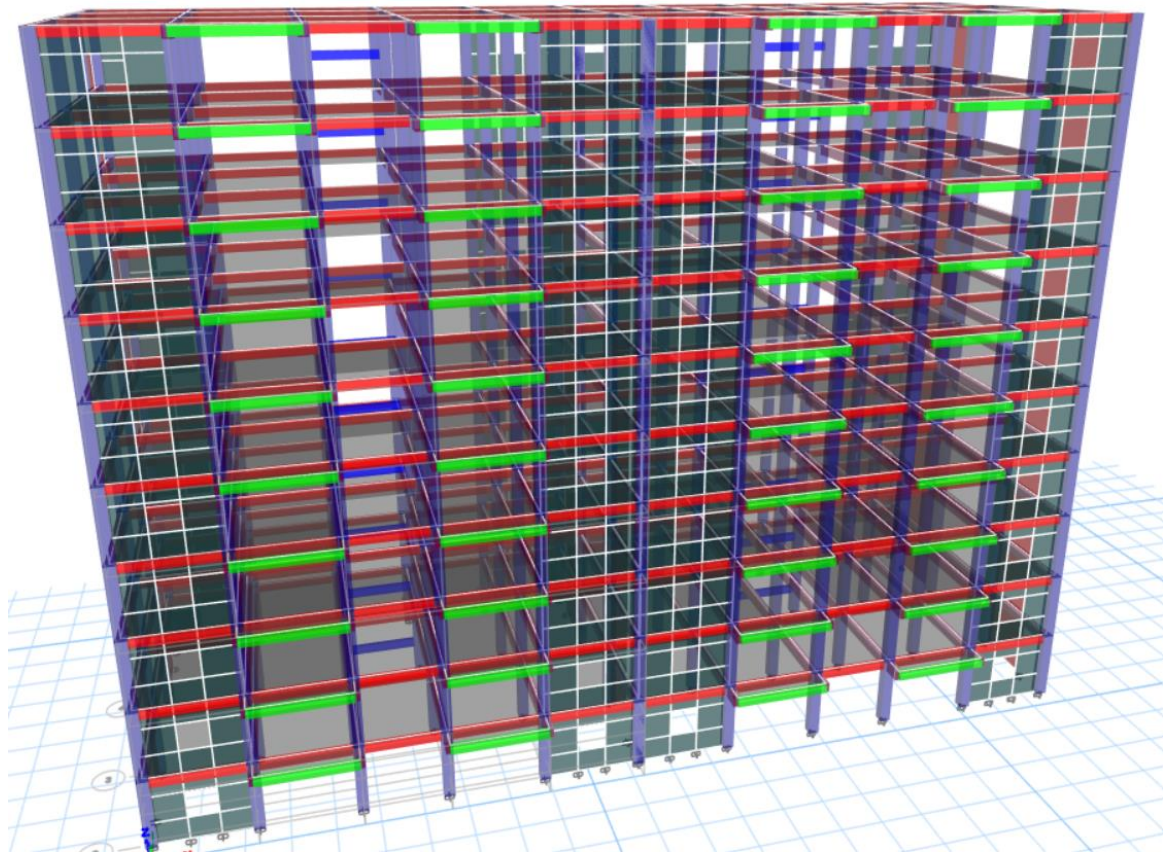
**Tableau 2.9 :** Vérification du déplacement selon Y pour la structure R+9

Niveaux	Diaphragmes	Uy(m)	$He \times 0.01$ (m)	$\delta_{ek} = ux \times R$	$\Delta = \delta_{ek} - \delta_{ek-1}$	Vérification $\Delta < 0,01 He$
10	D10	0.0180	0.0306	0.0630	0.00595	C.V
9	D9	0.0163	0.0306	0.0571	0.00630	C.V
8	D8	0.0145	0.0306	0.0508	0.00700	C.V
7	D7	0.0125	0.0306	0.0438	0.00735	C.V
6	D6	0.0104	0.0306	0.0364	0.00735	C.V
5	D5	0.0083	0.0306	0.0291	0.00770	C.V
4	D4	0.0061	0.0306	0.0214	0.00735	C.V
3	D3	0.0040	0.0306	0.0140	0.00665	C.V
2	D2	0.0021	0.0306	0.0074	0.00490	C.V
1	D1	0.0007	0.0306	0.0025	0.00245	C.V

**Note :**

L'ouvrage de référence est constitué de deux structure (R+9) identiques placées l'une à côté de l'autre avec un espacement de 47 mm comme l'exige le RPA et sont modélisées ensemble sur ETABS (Figure 2.2). Il est observé que les réponses sismiques de l'ouvrage restent identiques en termes de période et déplacement par contre l'effort tranchant il a doublé vu que les structures sont les mêmes.

Dans les chapitres qui suivront les comportements des structures avec et sans joints sismiques en tenant compte ou pas de l'ISS seront comparés à ceux de l'ouvrage de référence.



**Figure 2.2 :** Vu en 3D des deux structures jumelles à base fixe (l'ouvrage de référence).

## 2.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description de deux bâtiments identiques de l'ouvrage de référence : de neuf étages (R+9). Ces bâtiments sont construits avec des ossatures en portiques contreventés par des voiles en béton armé. Les vérifications nécessaires ont été effectuées conformément aux Règles Parasismiques Algériennes (RPA 99/2003). Dans le prochain chapitre, ces structures seront étudiées en tant que structures adjacentes afin d'évaluer la possibilité d'une collision entre elles. Des joints sismiques seront alors envisagés pour minimiser ou éliminer ce risque et en tenant compte de l'interaction sol-structure pour trois types de sol différents (sol rocheux, sol meuble et sol très meuble).

## Chapitre 3

---

*Etude des effets de l'ISS sur le comportement  
sismique des structures adjacentes*

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier les mêmes structures présentées et vérifiées dans le chapitre 2 mais cette fois ci elles sont supposées posées sur une base flexible. Cela signifie que l'on tient compte de l'interaction sol structures.

Les structures seront modélisées sur trois types de sol : Sol de type S<sub>1</sub> (rocheux), sol de type S<sub>3</sub> (meuble) et sol de type S<sub>4</sub> (très meuble) conformément à la classification donnée par les Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 (version 2003). Les structures sont supposées implantées dans la zone III selon le RPA99/V2003 toujours. La rigidité du sol dans le système sol-structure K<sub>ss</sub> sera calculée en translation sur les axes (X-X, Y-Y et Z-Z) et en rotation par rapport à l'axe (Z-Z). Ensuite, afin de comprendre les effets de l'ISS, nous calculons les réponses sismiques (période, déplacement et l'effort tranchant) et nous les comparerons à celles les résultats des structures de l'ouvrage de référence. Notons les deux structures sont totalement identiques.

### 3.2. Calcul des rigidités du sol

L'interaction sol-structure est modélisée par l'intermédiaire des ressorts élastiques discrets de translation horizontale (K<sub>h</sub>) et verticale (K<sub>v</sub>) et de rotation (K<sub>θ</sub>). Les coefficients de rigidité de ces ressorts sont donnés par les expressions de **Newmark** et **Resenblueth** pour les fondations rectangulaires (équation ci-dessous). Le tableau 2.1 suivant présente les valeurs des rigidités des ressorts pour les différentes directions et en fonction de la vitesse d'onde de cisaillement du sol associe aux différentes catégories du site pour une fondation de section 2x2 m.

$$k_h = 2(1 + \nu)\beta_h\sqrt{BL} \quad (3.1a)$$

$$k_v = \frac{G}{(1 - \nu)}\beta_v\sqrt{BL} \quad (3.1b)$$

$$k_\theta = \frac{G}{(1 - \nu)}\beta_\theta BL^2 \quad (3.1c)$$

Avec

$$\frac{L}{B} = 1 ; (\beta_h = 1, \beta_v = 2,16, \beta_\theta = 0,5)$$

$$\frac{L}{B} = 2 ; (\beta_h = 0,94, \beta_v = 2,2, \beta_\theta = 0,6)$$

$$\frac{L}{B} = 4 ; (\beta_h = 1, \beta_v = 2,4, \beta_\theta = 0,79)$$

où L et B sont, respectivement, la longueur et la largeur de la fondation.  $\beta_h, \beta_v$  et  $\beta_\theta$  sont des paramètres dépendant de la géométrie.

**Tableau 3.1.** Rigidité de ressorts du sol

Type du sol	Très meuble (1)	Meuble (2)	Ferme (3)	Très ferme (4)
Vitesse d'onde de cisaillement, $V_s$ (m/s)	100	200	400	800
Masse volumique, $\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	20	22	22
Coefficient de poisson, $\nu$	0.45	0.4	0.3	0.3
$K_h$ (10 <sup>6</sup> kN/m)	1.04	4.48	18.30	73.20
$K_v$ (10 <sup>6</sup> kN/m)	1.43	5.84	22.00	88.10
$K_\theta$ (10 <sup>6</sup> kNm/rd)	1.31	5.33	20.10	80.50

### 3.3. Comparaison et discussion des résultats :

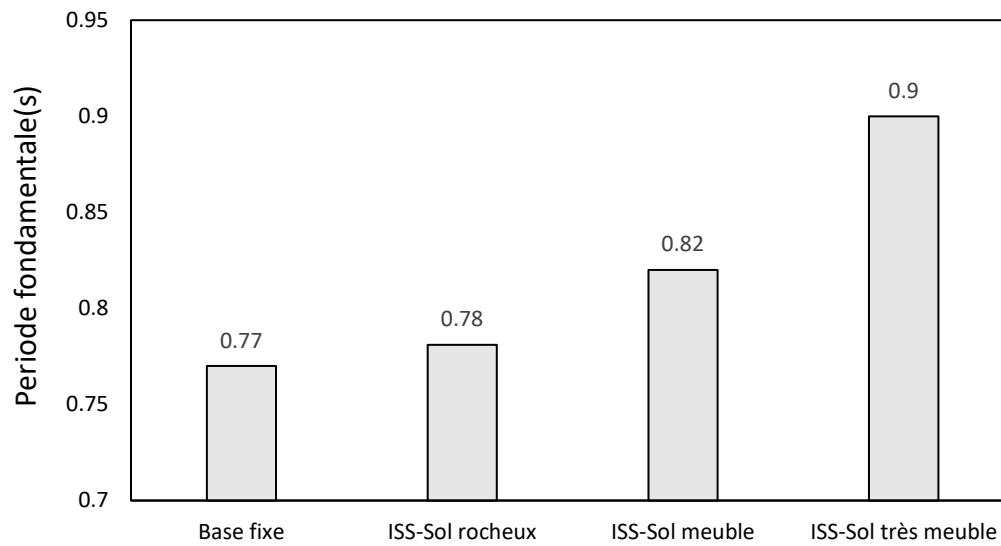
#### 3.3.1. Réponses sismiques maximales

Suivant l'axe (X-X) :

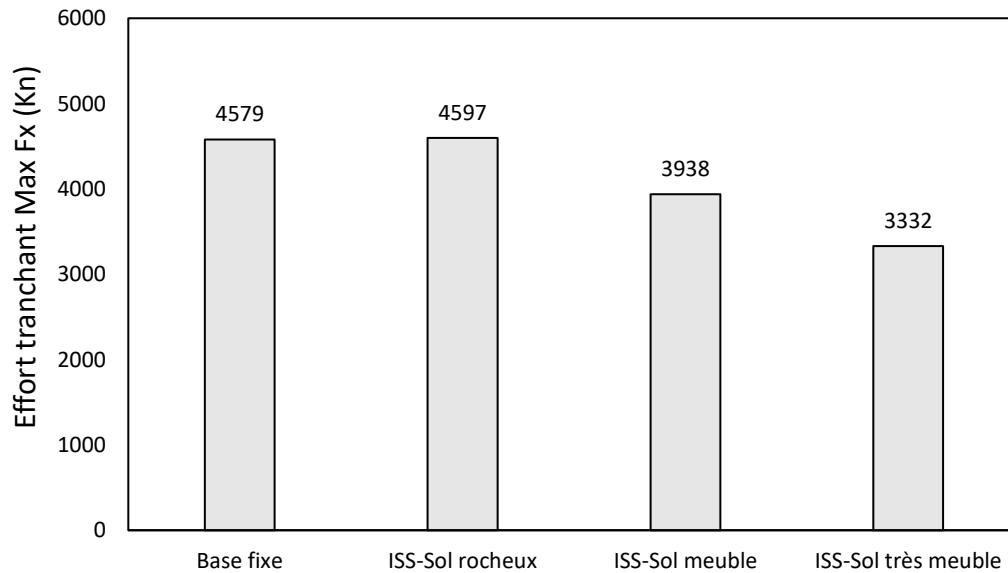
Le tableau 3.2 montre les réponses sismiques maximales de la structure suivant l'axe (X-X) e, termes de la période fondamentale, de m'effort tranchant maximal et le déplacement inter-étage maximal. Ces résultats sont transcrits sur les figures 3.1, 3.2 et 3.3, respectivement.

**Tableau 3.2 :** Réponses sismiques maximales de la structure suivant l'axe (X-X)

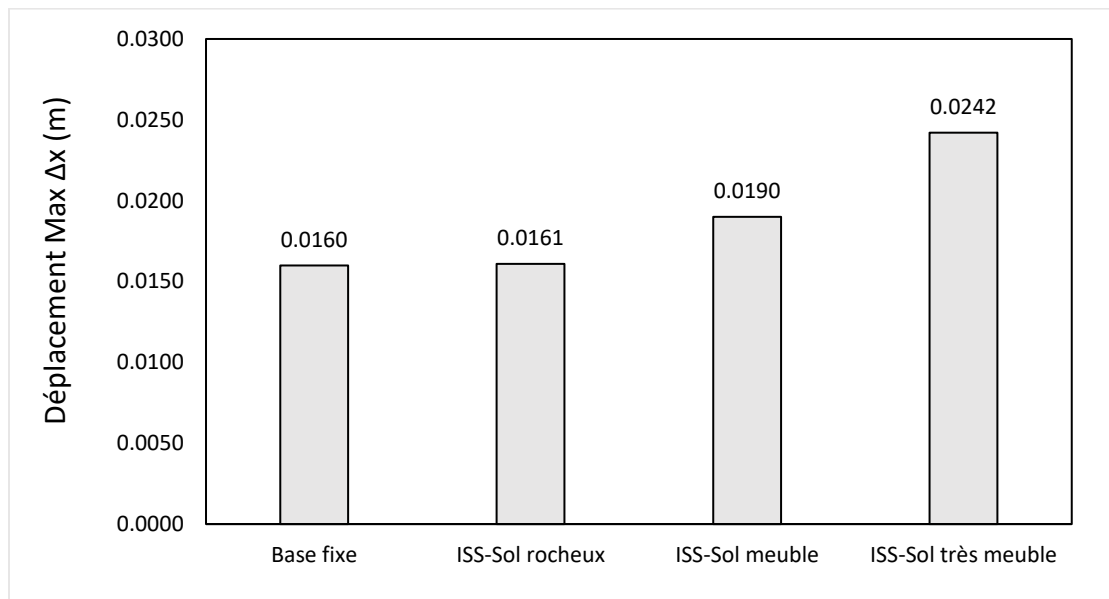
Réponse sismique de structure (R+9) sur l'axe (X-X)				
Réponse	Base fixe	ISS-Sol rocheux	ISS-Sol meuble	ISS-Sol très meuble
Période fondamentale (s)	0,77	0,78	0,82	0,9
Effort tranchant Max Fx (KN)	4579	4597	3938	3332
Déplacement Max $\Delta x$ (m)	0,0160	0,0161	0,0190	0,0242



**Figure 3.1 :** Période fondamentale de la structure à base fixe et à base flexible pour différents types de sol selon l'axe (X-X)



**Figure 3.2 :** Effort tranchant maximal de la structure à base fixe et à base flexible pour différents types de sol selon l'axe (X-X)



**Figure 3.3 :** Déplacement maximal de la structure à base fixe et à base flexible pour différents types de sol selon l'axe (X-X)

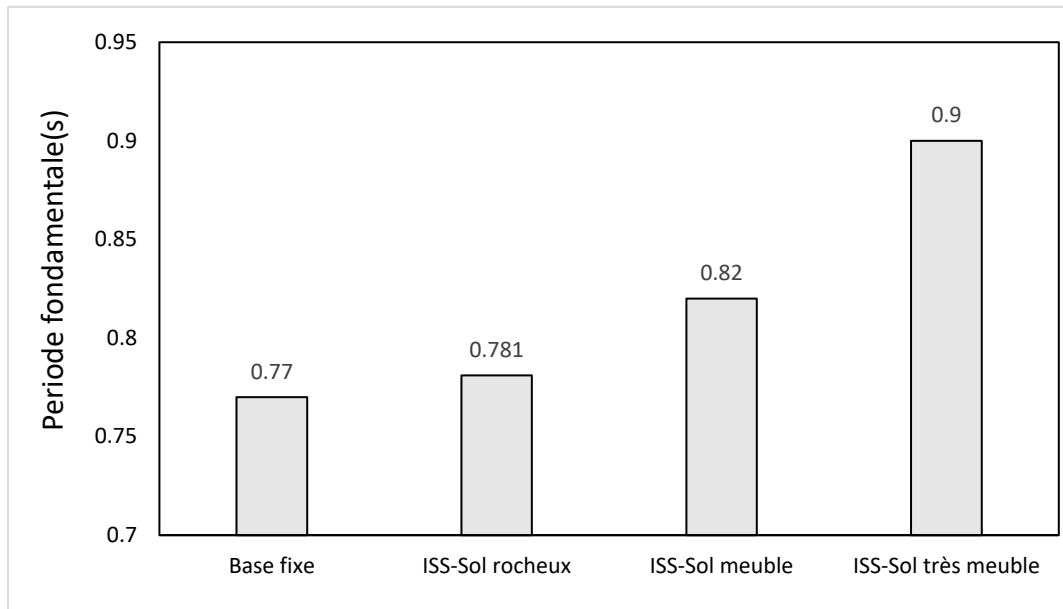
Les réponses sismiques maximales ci-dessus suivant l'axe (X-X) montrent que la période fondamentale est en augmentation continue d'une différence de 14% entre la base fixe et le sol très meuble. L'effort tranchant a chuté d'une valeur de 25% entre la base fixe et le sol très meuble (S4). L'écart entre le déplacement de la base fixe et celui du sol très meuble est de 33%.

#### Suivant l'axe (Y-Y)

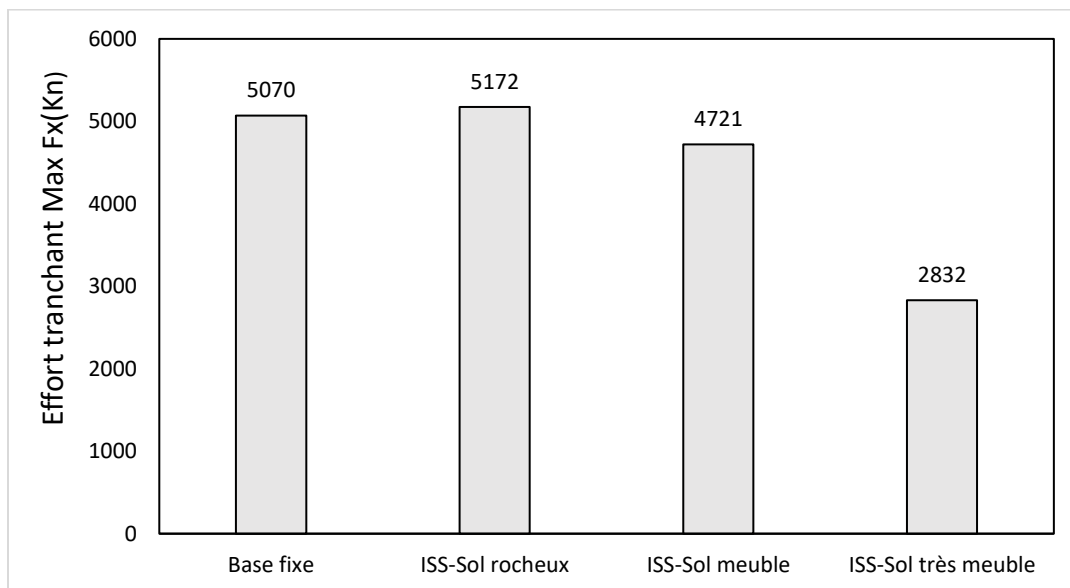
La réponse de la structure selon l'axe Y-Y est montrée sur le tableau 3.3 et les figures 3.4 à 3.6.

**Tableau 3.3 :** Réponses sismiques maximales de la structure suivant l'axe (Y-Y)

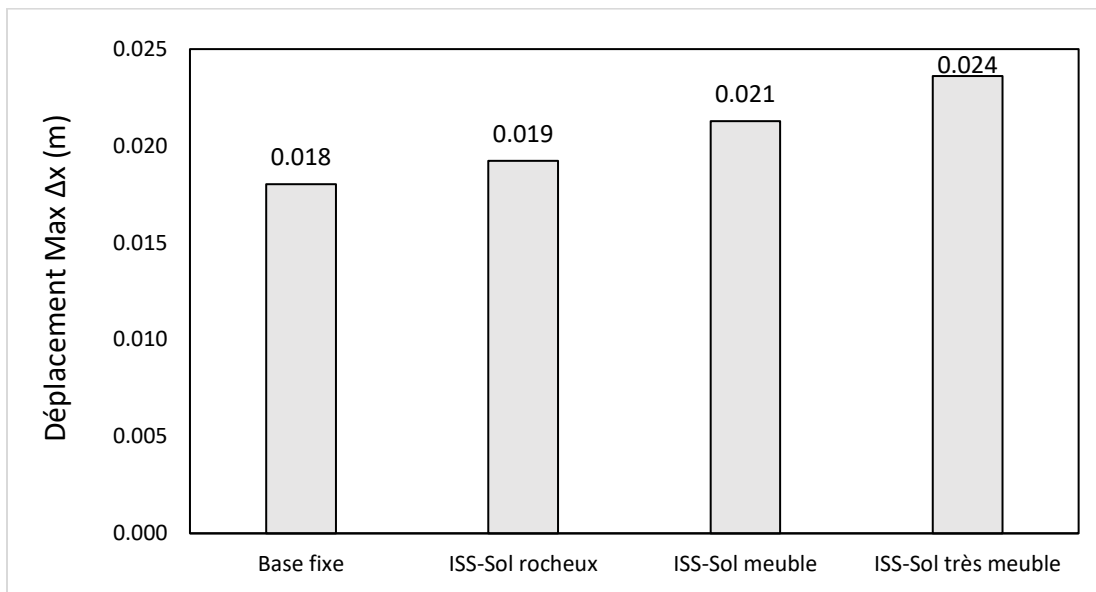
Réponse sismique de structure (R+9) sur l'axe (Y-Y)				
Réponse	Base fixe	ISS-Sol rocheux	ISS-Sol meuble	ISS-Sol très meuble
Période fondamentale(s)	0,77	0,781	0,82	0,9
Effort tranchant Max $F_y$ (KN)	5070	5172	4721	2832
Déplacement Max $\Delta x$ (m)	0,018	0,019	0,021	0,024



**Figure 3.4 :** Période fondamentale de la structure à base fixe et à base flexible pour différents types de sol selon l'axe (Y-Y)



**Figure 3.5 :** Effort tranchant maximal de la structure à base fixe et à base flexible pour différents types de sol selon l'axe (Y-Y)



**Figure 3.6 :** Déplacement maximal de la structure à base fixe et à base flexible pour différents types de sol selon l'axe (Y-Y)

Les réponses sismiques maximales suivant l'axe (Y-Y) montrent que la période fondamentale est en augmentation remarquable de 14% entre la base fixe et le sol très meuble. L'effort tranchant a diminué avec pourcentage de 42% entre la base fixe et le sol très meuble (S4). Le déplacement de la structure sur sol très meuble est de 25% de plus que celui d'une base fixe.

### 3.3.2. Déplacements inter-étages

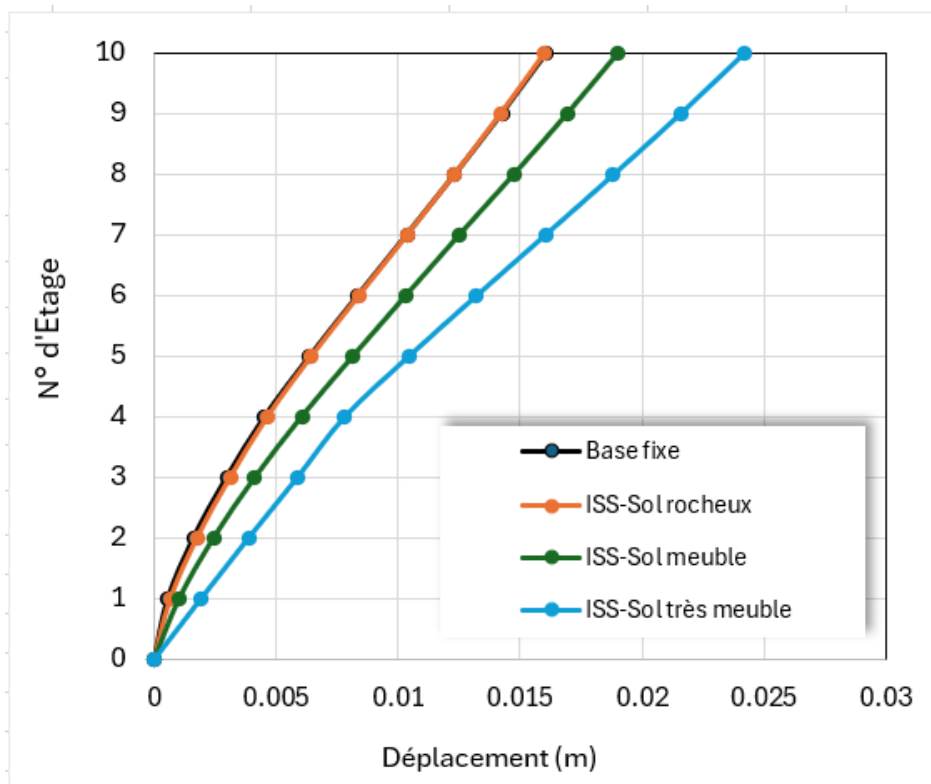
Le tableau 3.4 montre les périodes propres de la structure et le tableau 3.5 montre le déplacement inter-étage selon la direction X-X. Ce dernier est schématisé sur la figure 3.7.

**Tableau 3.4 : Périodes Propres dans la direction X-X**

Période	Structure de Référence b, Fixe	S1(sol rocheux)	S2(sol meuble)	S3(sol très meuble)
Mode 1	0,77	0,786	0,82	0,904
Mode 2	0,717	0,728	0,774	0,885
Mode 3	0,486	0,492	0,519	0,586
Mode 4	0,21	0,218	0,224	0,235
Mode 5	0,172	0,174	0,182	0,194
Mode 6	0,129	0,132	0,137	0,144
Mode 7	0,098	0,102	0,104	0,109
Mode 8	0,078	0,08	0,082	0,085

**Tableau 3.5 : Déplacement inter-étage selon l'axe (X-X)**

Déplacement suivant x	Base fixe	ISS-Sol rocheux	ISS-Sol meuble	ISS-Sol très meuble
10	0,016091	0,016024	0,019033	0,024182
9	0,014256	0,01422	0,016946	0,021565
8	0,012331	0,012326	0,01476	0,018828
7	0,010348	0,010374	0,012514	0,016025
6	0,008345	0,008394	0,010318	0,013204
5	0,006377	0,006444	0,008149	0,010435
4	0,00452	0,004634	0,00604	0,007801
3	0,002962	0,003107	0,004121	0,005863
2	0,001601	0,00174	0,002423	0,003857
1	0,000553	0,000655	0,001018	0,001911
0	0	0	0	0



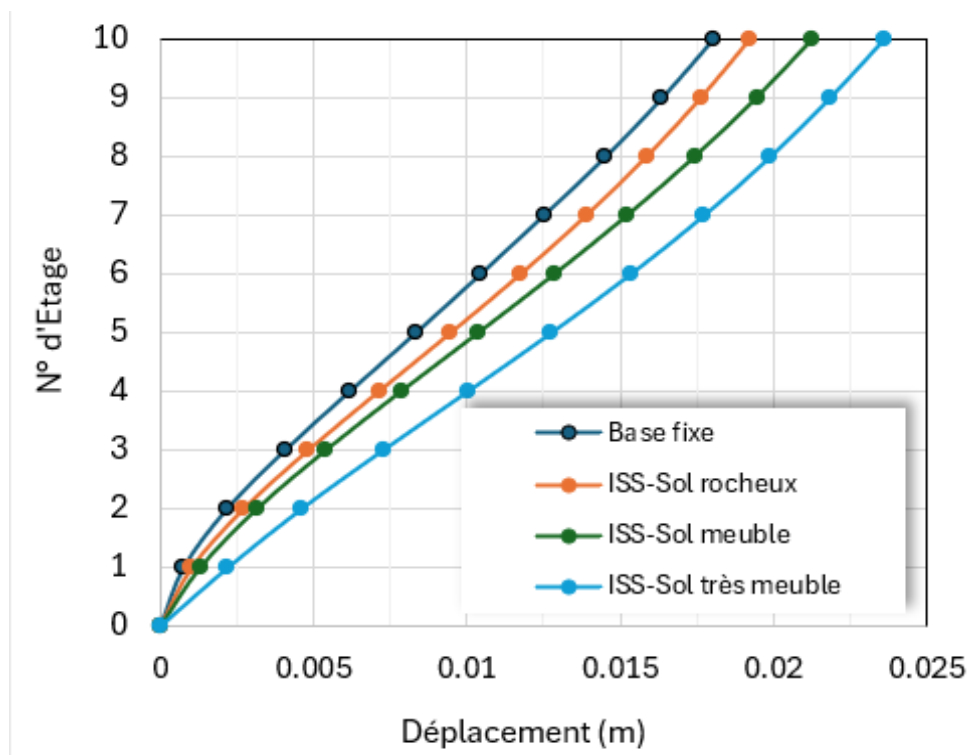
**Figure 3.7 :** Déplacement inter-étage selon l'axe (X-X)

On voit sur la courbe figure 3.7 que la différence entre le déplacement de la structure en base fixe et en base flexible est négligeable et leurs courbes sont presque superposées, contrairement aux écarts entre base fixe et sol meuble et très meuble sont en augmentation proportionnelle au nombre d'étages.

Le tableau 3.6 montre le déplacement inter-étage selon l'axe (Y-Y). Ce dernier est schématisé sur la figure 3.8.

**Tableau 3.6 :** Déplacement inter-étage selon l'axe (Y-Y)

Déplacements suivant Y-Y	Base fixe	ISS-Sol rocheux	ISS-Sol meuble	ISS-Sol très meuble
10	0,018028	0,019233	0,021289	0,023605
9	0,016361	0,017636	0,019464	0,02184
8	0,014518	0,015864	0,01745	0,019898
7	0,012505	0,013902	0,015246	0,017739
6	0,010443	0,011758	0,012872	0,015349
5	0,008334	0,009475	0,010382	0,012757
4	0,006168	0,007127	0,007856	0,01003
3	0,004061	0,004823	0,005401	0,007269
2	0,00217	0,002716	0,003153	0,004604
1	0,000753	0,001021	0,001298	0,002203
0	0	0	0	0



**Figure 3.8 :** Déplacement inter-étage selon l'axe (Y-Y)

Selon l'axe (Y-Y) le déplacement inter-étage est en augmentation par rapport au changement du type sol.

### **3.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a étudié les deux structures adjacentes posées sur une base flexible et modélisée sur trois types de sol tout en tenant en compte de l'interaction sol structures.

Nous avons commencé par définir les réponses sismiques (période, déplacement et effort tranchant) pour les 3 différents types de sol  $S_1$ ,  $S_3$  et  $S_4$  et les comparer avec les résultats de structure de référence.

On a trouvé que, grâce à la prise en compte de l'ISS ont a eu un effort tranchant décroissant par rapport à la rigidité du sol. Le déplacement des structures sur le sol ( $S_4$ ) est de 30% de plus que celui sur base rigide. La période a augmenté de 14 %.

L'ISS a un effet nuisible sur le comportement sismique de nos structures en termes de déplacement et période. Contrairement, pour l'effort tranchant, l'ISS joue un rôle favorable.

## Chapitre 4

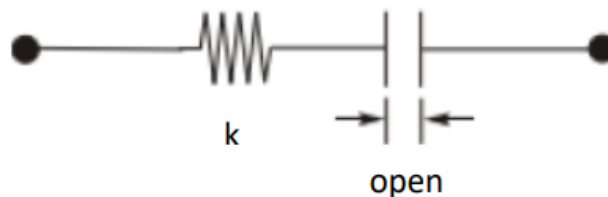
---

*Etude du comportement du joint sismique de type gap*

## 4.1. Introduction

Comme il a été montré dans le chapitre précédent, le déplacement de la structure a dépassé celui préconisé par le RPA99/V2003. Pour cela, nous allons choisir un joint sismique « GAP » comme solution pour notre problème de collision entre structures qui sont posées sur le type de sol très meuble (S<sub>4</sub>).

Le joint sismique sera mis en façade avant et arrière sur tous les niveaux entre planchers sachant que les planchers ont la même hauteur d'élévation. Cet élément est constitué d'un ressort en série avec une ouverture (Figure 4.1). La vue en élévation qui représente l'élément GAP est montrée sur la figure 4.2.



**Figure 4.1:** Elément GAP.

**Note :** Le choix du GAP dans cette étude est basé sur le mémoire de master (2022 2023) réalisé par (O. Amri) sous le titre « Etude des performances de modèles de joints sismiques sur le comportement dynamique des structures adjacentes ».

## 4.2. Comportement de structures identiques

### 4.2.1. Réponses sismiques des structures

#### 4.2.1.1. Espacement

L'espacement entre les structures est calculé selon le RPA99/2003δ comme

$$15\text{mm} + (\delta_1 + \delta_2) \text{ mm} \geq 40\text{mm}$$

$$\delta = 15\text{mm} + (16 + 16) \text{ mm} = 47\text{mm} > 40\text{mm}$$

#### 4.2.1.2. Période fondamentale des structures

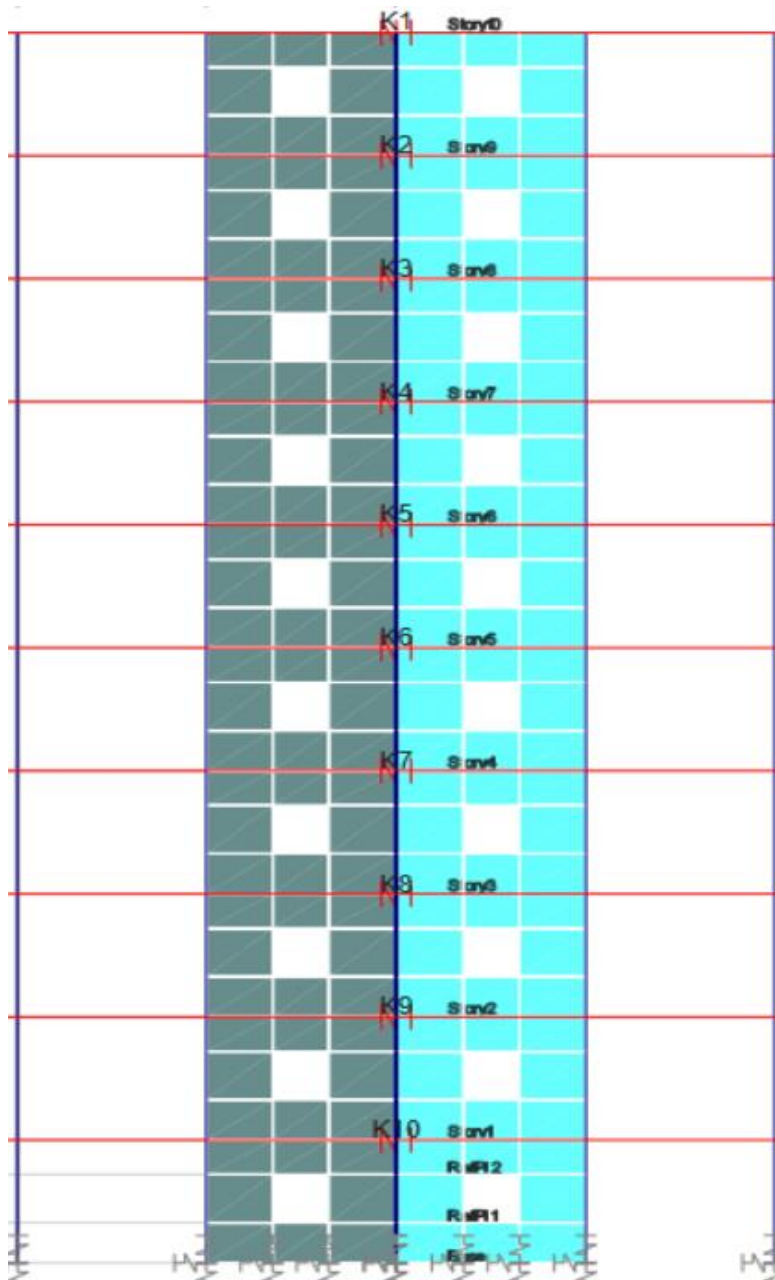
Cette étude est réalisée sur un sol de type (S<sub>4</sub>), la période fondamentale donnée par l'ETABS est :  
 $T = 0,906 \text{ (s)}$

#### 4.2.1.3. Déplacement maximal Sd

Le déplacement donné par l'ETABS pour les deux structures est 0,025 (m) = 25 (mm).

#### 4.2.1.4. Effort tranchant

On a obtenu :  $V_x = 1711,09 \text{ kN}$  ,  $V_y = 1472,02 \text{ kN}$



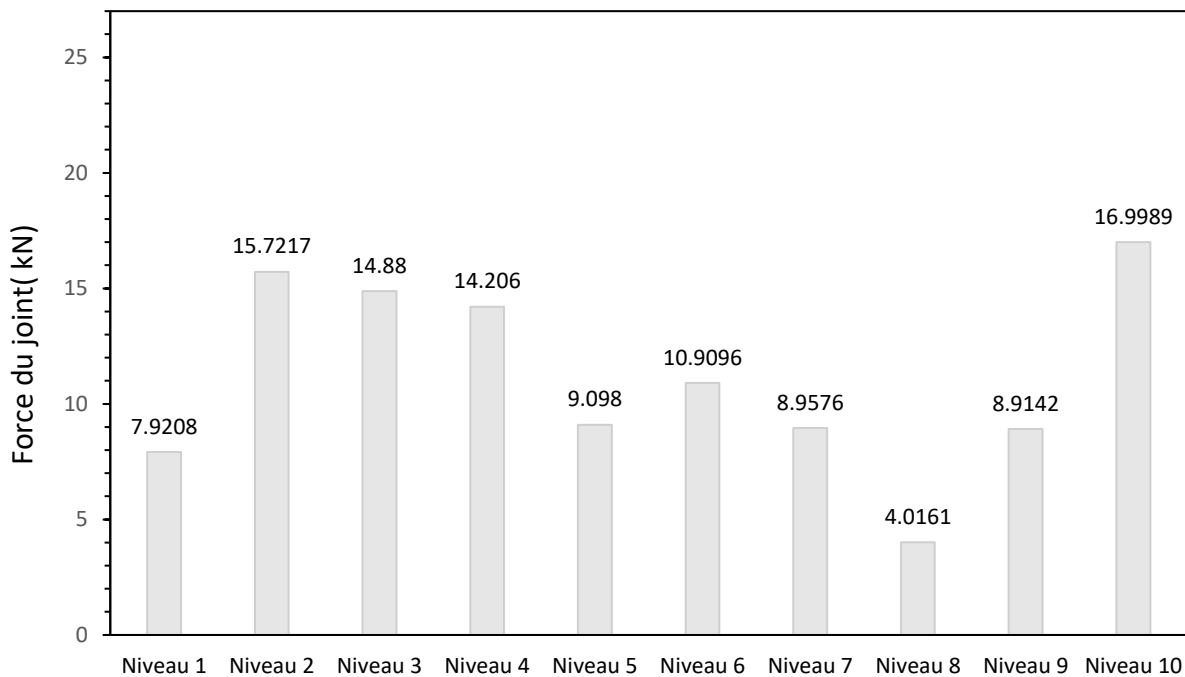
**Figure 4.2 :** Vue en élévation qui représente l'élément GAP

#### 4.2.2. Efforts repris par le joint sismique dans les différents niveaux

La force appliquée au joint par niveau est montrée dans le tableau 4.2 et la figure 4.3.

**Tableau 4.1** : Force appliquée au joint par niveau

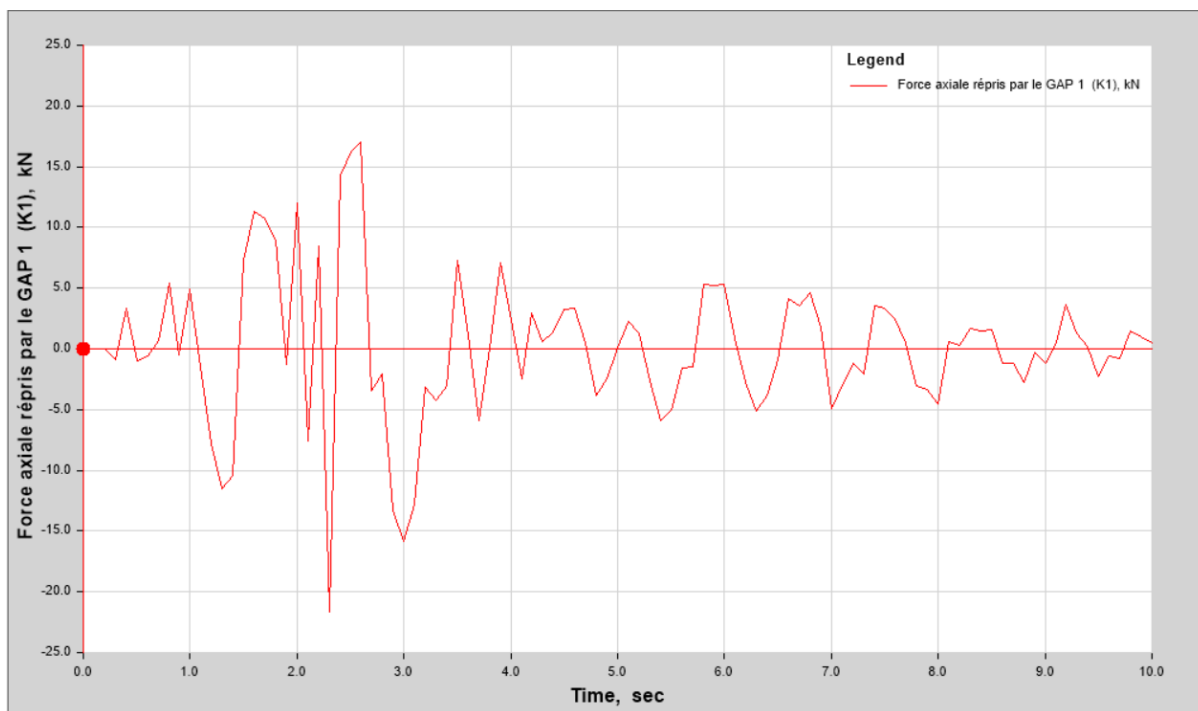
Nom de joint sismique	Niveau	Force du joint( kN)
K10	Niveau 1	7,9208
K9	Niveau 2	15,7217
K8	Niveau 3	14,88
K7	Niveau 4	14,206
K6	Niveau 5	9,098
K5	Niveau 6	10,9096
K4	Niveau 7	8,9576
K3	Niveau 8	4,0161
K2	Niveau 9	8,9142
K1	Niveau 10	16,9989



**Figure 4.3** : Force exercée sur le GAP par niveau.

Suite à l'emplacement du joint sismique GAP, on remarque comme le montre le tableau ci-dessus atteint son maximum au sol à la base et dans les trois derniers étages, ce qui explique que les structures se déplacent plus dans ces niveaux. C'est la prise en compte de l'ISS qui a causé ce comportement à la base.

La figure ci-dessous montre les résultats des efforts repris par le joint sismique placé dans le dernier étage nommé K1.



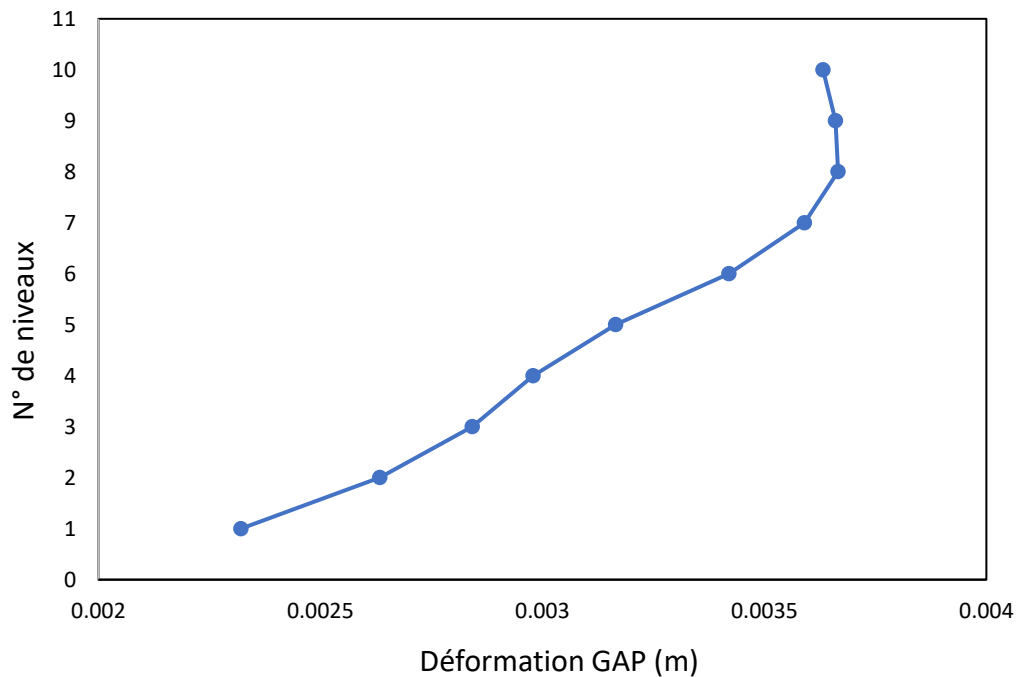
**Figure 4.4** : Force exercée sur le GAP en fonction du temps.

### 4.2.3. Déformation du GAP

Le tableau 4.2 montre la déformation du GAP par niveau et la figure 4.5 la schématise.

**Tableau 4.2** : Déformation du GAP (m) par niveau

N° de niveaux	Déformation GAP (m)
1	0,002321
2	0,002634
3	0,002842
4	0,002979
5	0,003165
6	0,00342
7	0,00359
8	0,003666
9	0,00366
10	0,003632



**Figure 4.5** : Déformation du GAP par niveau

Sachant que L'accélogramme appliqué est celui d'un faible séisme qui la réplique du séisme d'El Asnam 1980 (El Asnam EST – WEST) et que les deux structures sont parfaitement identiques. Cela

veut dire qu'ils ont la même réponse sismique ce qui explique la petite déformation du joint sismique (4 mm) et le petit effort repris par ce dernier.

### 4.3. Comportement de structures non identiques

Dans la première partie nous avons étudié le comportement du joint sismique de type GAP avec deux bâtiments identiques ; ce qui veut dire que la même réponse sismique (période, effort tranchant, etc) est obtenu pour chacune des deux structures.

Dans cette partie pour changer la période nous allons changer les propriétés d'un des deux bâtiment (épaisseur du voile, chargement, les dimensions des éléments porteur, ...) et nous comparons les résultats avec les résultats de la première partie (Figure 4.6).

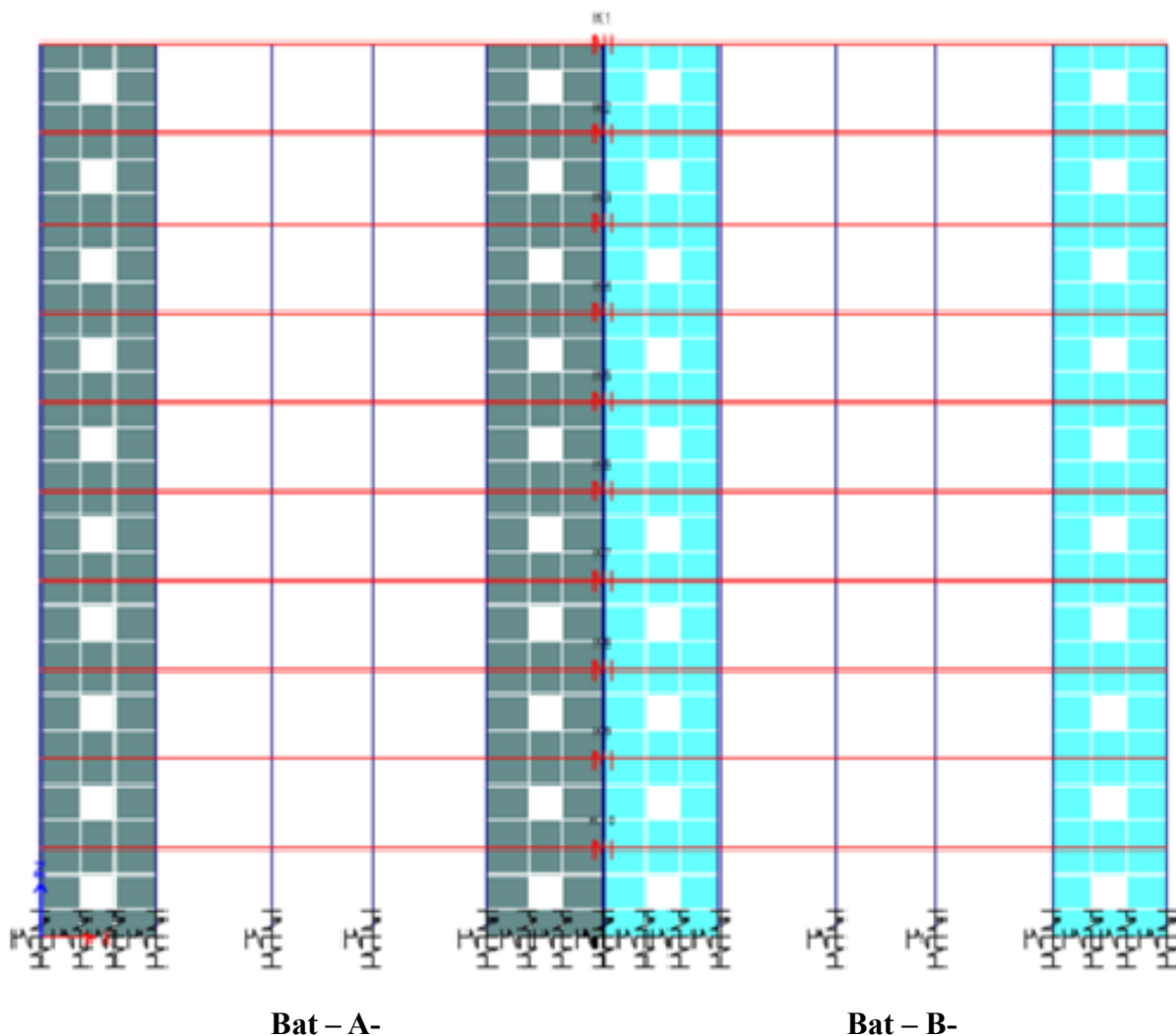


Figure 4.6 : Deux structures adjacentes avec différentes périodes

### 4.3.1. Réponses sismiques

#### 4.3.1.1. Période fondamentale des structures

Cette étude est réalisée sur un sol de type (S4), la période fondamentale donnée par l'ETABS est :

$$T_A = 0,86 \text{ (s)} , T_B = 0.90 \text{ (s)}$$

#### 4.3.1.2. Espacement

L'espacement entre les structures est calculé selon RPA99/2003 et obtenu égal à  $\delta = 15\text{mm} + (\delta_1 + \delta_2)$   
 $\text{mm} \geq 40\text{mm}$

$$\delta = 15\text{mm} + (16 + 16) \text{ mm} = 47\text{mm} > 40\text{mm}$$

#### 4.3.1.3/ Déplacement maximal Sd

Il est donné par l'ETABS

$$\text{Structure A : } 0.020 \text{ (m)} \Rightarrow 20 \text{ (mm)} , \text{ Structure B : } 0.024 \text{ (m)} \Rightarrow 24 \text{ (mm)}$$

#### 4.3.1.3. Effort tranchant

$$V_x = 4338.46 \text{ KN}$$

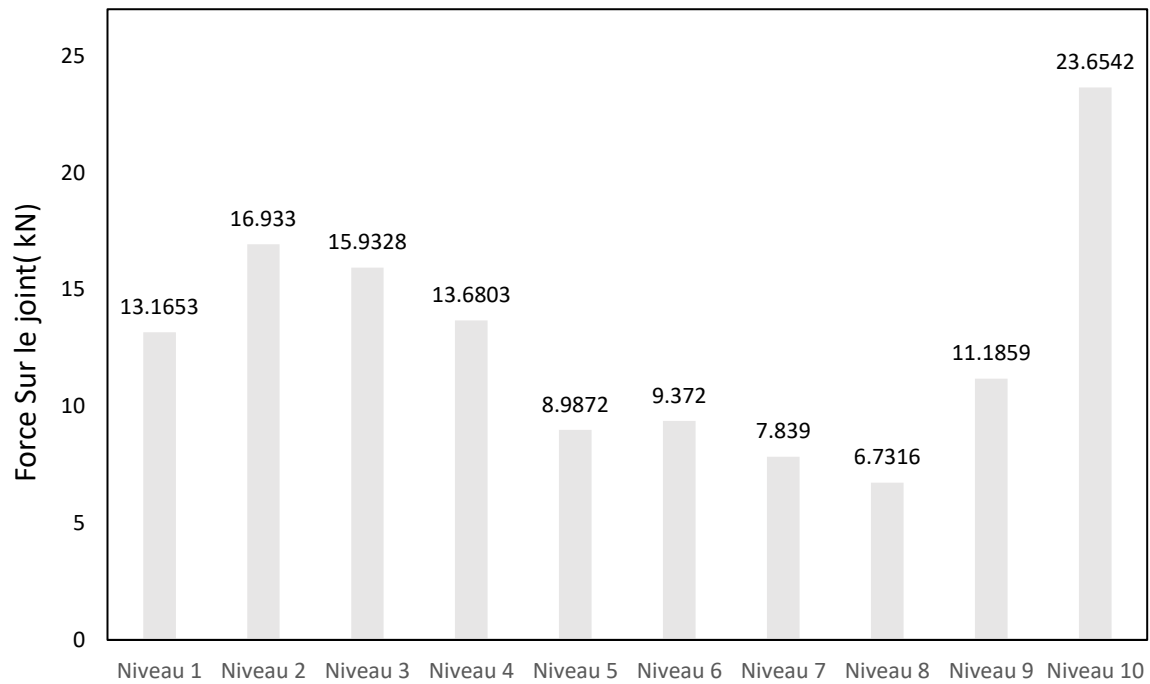
$$V_y = 5812.35 \text{ KN}$$

### 4.3.2. Force appliquée sur le GAP

La force appliquée au GAP est obtenue et montrée sur le tableau 4.3. Les résultats sont mieux représentés sur la figure 4.4. Les autres résultats sont montrés sur les figures qui suivront.

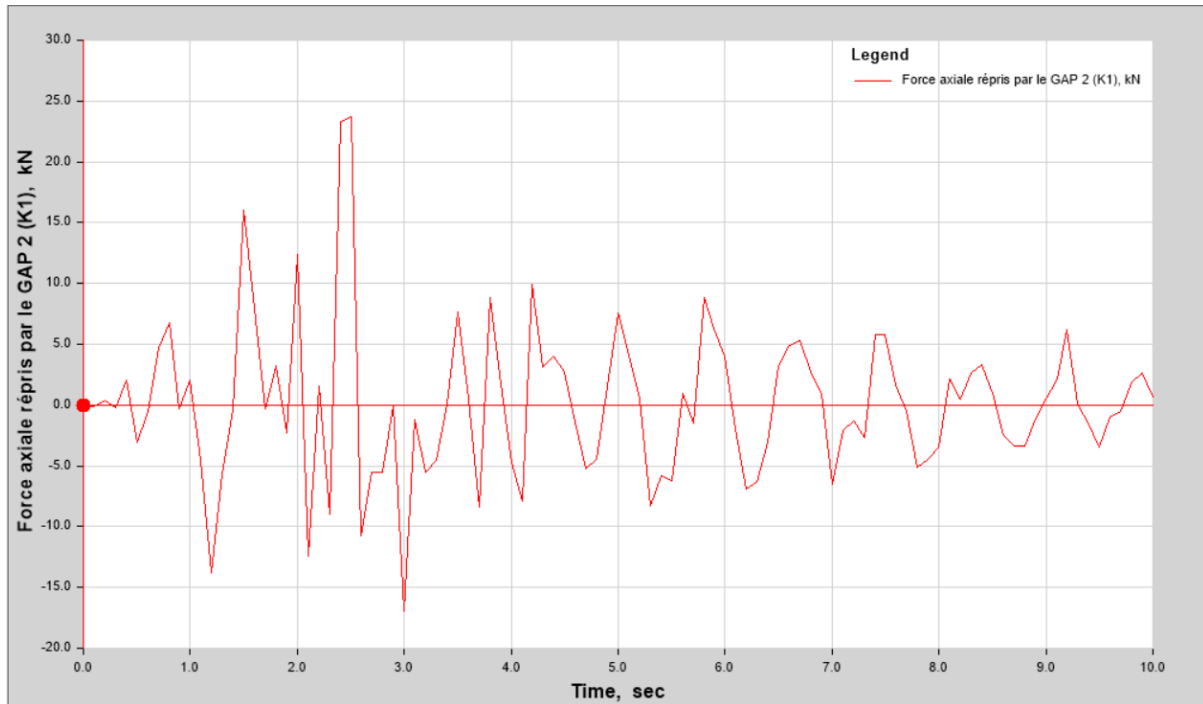
**Tableau 4.3** : Force appliquée au joint par niveau

Nom du joint sismique	Niveaux	Force du joint (kN)
K10	Niveau 1	13.1653
K9	Niveau 2	16.933
K8	Niveau 3	15.9328
K7	Niveau 4	13.6803
K6	Niveau 5	8.9872
K5	Niveau 6	9.372
K4	Niveau 7	7.839
K3	Niveau 8	6.7316
K2	Niveau 9	11.1859
K1	Niveau 10	23.6542



**Figure 4.7** : Force exercée sur le GAP pour différents niveaux

On remarque que la force atteint son maximum au sol à la base et dans le dernier étage d'une valeur de 24 kN. La force dans le deuxième cas reprise par le joint sismique est supérieur à la force reprise dans le premier cas est de 33%



**Figure 4.8 :** Force exercée sur le GAP en fonction du temps.

La force exercée sur le joint sismique du deuxième cas est supérieur à celle du premier cas (Figure 4.9).

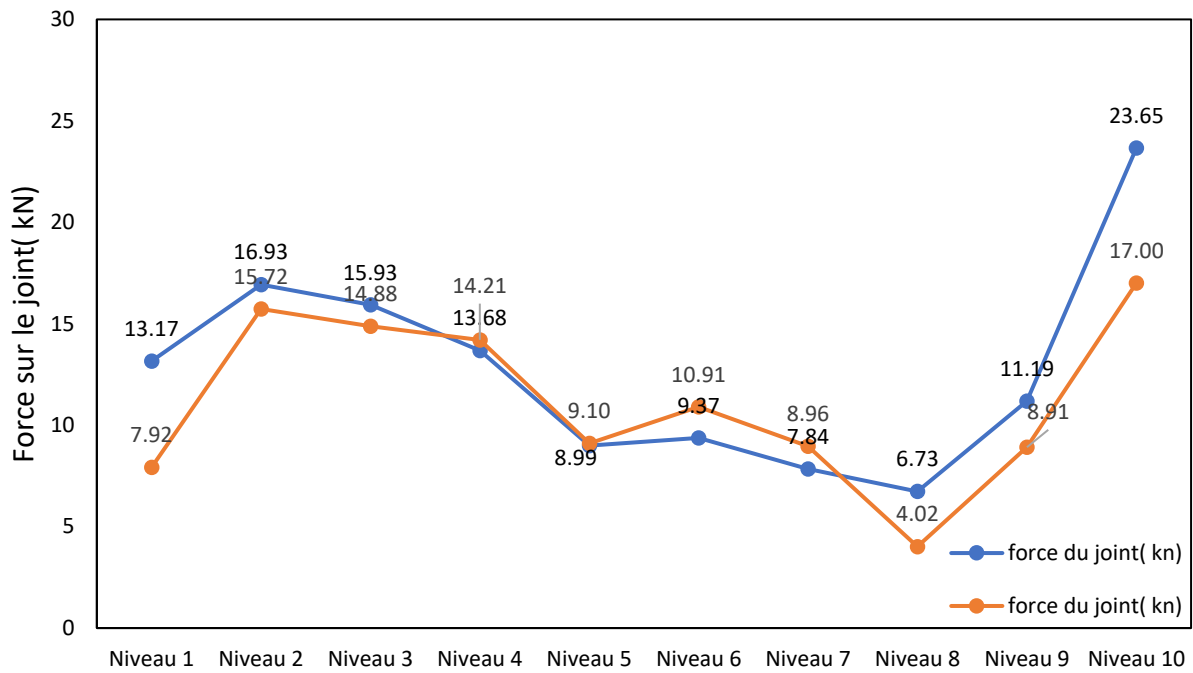


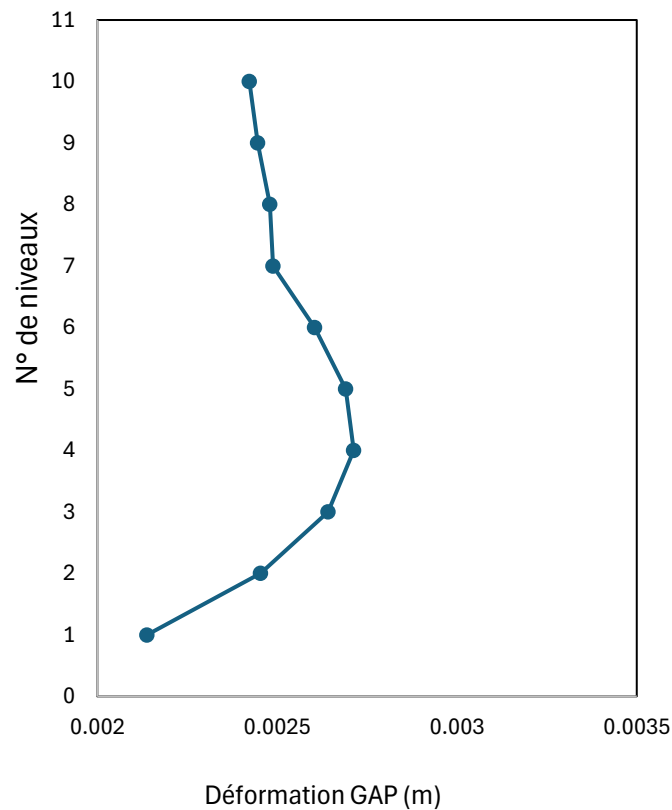
Figure 4.9 : Comparaison de la force exercée sur le GAP par niveau

### 4.3.3. La Déformation du GAP

La déformation du GAP dans ce deuxième cas est montrée par le tableau 4.4 et schématisée sur la figure 4.0.

**Tableau 4.4 :** Déformation du GAP (m) par niveau

N° de niveaux	Déformation GAP 2 (m)
1	0,002138
2	0,002454
3	0,002642
4	0,002713
5	0,002691
6	0,002604
7	0,002489
8	0,00248
9	0,002446
10	0,002423



**Figure 4.10 :** Déformation du GAP par niveau

La déformation maximale du joint sismique se passe dans le 4<sup>ème</sup> niveau et arrive à 2,7 mm. On observe que la déformation maximale dans le deuxième cas est inférieure à celle du premier cas, ce qui explique que l'un des deux bâtiments est plus rigide.

#### **4.4. Conclusion**

Rappelons que dans le troisième chapitre on a trouvé que l'espacement entre les deux structures adjacentes proposé par le RPA99/2003 ne suffit pas. Ainsi, dans ce chapitre on a proposé un joint sismique de type élément GAP comme solution car les structures s'entrechoquent. On a étudié son comportement puis on a changé les propriétés d'une des deux structures et cela c'était pour diminuer la période fondamentale de cette structure et on a observé que :

- La déformation du joint sismique est de 2 mm à 3 mm ce qui concorde avec l'écart entre le calcul d'étabs et l'exigence réglementaire.
- L'effort repris par le joint sismique a augmenté de 33% lors du changement des propriétés de la structure et est passé de 16 à 24 (KN) de l'étage supérieur.
- L'effort tranchant lorsqu'on a connecté les deux bâtiments avec le joint sismique a augmenté de 2% par rapport à celui des deux structures sans joint sismique ce qui nous mène à dire que la présence du joint sismique excite plus le bâtiment.

---

## *Conclusions générales*

Ce projet a porté sur l'étude de la problématique du comportement des structures adjacentes en béton armé en tenant compte de l'interaction sol-structures lors de sollicitations sismiques. Les structures étudiées sont des portiques contreventés par des voiles d'une hauteur (10 niveaux). L'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel de calcul ETABS 19, en tenant compte de différents types de sol et en utilisant les données de l'accélérogramme enregistré à El Asnam durant les répliques qui ont suivi le séisme principal du 10 octobre 1980.

Les résultats obtenus sont basés sur des comparaisons entre structures à base fixe considérées comme références et d'autres à base flexible de différents types de sol puis on a introduit un joint sismique de type GAP et observé son comportement.

Durant cette étude on a remarqué que:

L'écart entre la réponse sismique d'une structure posée sur une base fixe ou encadrée et celle d'une structure posée sur un sol rocheux de type S1 est négligeable, par contre celle des sols S3 et S4 est considérable. Il est fortement conseillé de prendre en considération l'ISS dans la conception des ouvrages surtout quand-il s'agit de construction sur sol S2, S3 et S4.

La présence du sol rend le système plus flexible et allonge sa période propre. Cet allongement est d'autant plus prononcé pour des structures élancées, elle atteint les 33% entre structure sur sol de type S4 et sol rocheux ou base fixe .

La prise en compte de l'interaction sol-structure a réduit considérablement l'effort tranchant jusqu'à 37% dans notre étude. Elle a eu donc un effet bénéfique pour les structures.

Le déplacement inter-étage s'amplifie de plus en plus en changeant le type de sol et en montant le niveau jusqu'au sommet et atteint une valeur importante de 30 % d'écart entre le sol S4 et le sol S1.

La formule de l'espacement entre deux structures exigées par le RPA99/2003 a été respectée mais cela n'a pas empêché que les structures subissent un entrechoquement et plus particulièrement dans l'étude réalisée sur le sol S4. Il est préjudiciable de prendre en compte l'ISS pour éviter que les structures rentrent en collision.

La présence du joint sismique aide les structures à se comporter au mieux face à un séisme en reprenant l'effort qui peut être causé par l'entrechoquement.

Les joints sismiques améliorent la performance sismique des bâtiments adjacents.

Dans cette étude, les structures sont supposées obéir à la loi de l'élasticité. Cependant, pour mieux approcher la performance sismique de nos structures. Comme recommandation, il est possible de refaire une étude similaire tout en considérant le comportement non linéaire de la structure.

# **BIBLIOGRAPHIE**



- [1] **Aguilar, J., Juarez, H., Ortega, R., Iglesias, J.** " Le tremblement de terre au Mexique du 19 septembre 1985 — Statistiques des dommages et des techniques de renforcement dans les bâtiments en béton armé affectés par le séisme de 1985 ", *Earthquake Spectra*, 5(1), pp. 145–151, 1989. <https://doi.org/10.1193/1.1585516>
- [2] **Jain, S. K., Murty, C. V. R., Dayal, U., Jaswant, N. A., Sailender, K. C.** "Apprendre des tremblements de terre : Rapport de terrain sur les dommages structurels et géotechniques subis lors du séisme de Bhuj du 26 janvier 2001 (M7. 9) dans l'ouest de l'Inde", Département de génie civil, Institut indien de technologie, Kanpur, Inde, 2001.
- [3] **Cole, G. L., Dhakal, R. P., Turner, F. M.** "Dommages dus aux heurts de bâtiments observés lors du séisme de Christchurch de 2011", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(5), pp. 893–913, 2012. <https://doi.org/10.1002/eqe.1164>.
- [4] **Sharma, K., Deng, L., Noguez, C. C.** "Enquête sur le terrain sur la performance des structures de bâtiments lors du séisme de Gorkha du 25 avril 2015 au Népal", *Engineering Structures*, 121, pp. 61–74, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.043> .
- [5] **Bechtoula, H., Ousalem, H.** "Le séisme de Zemmouri (Algérie) du 21 mai 2003 : dommages et réponses aux catastrophes", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(1), pp. 161–174, 2005. <https://doi.org/10.3151/jact.3.161>.
- [6] **NIST 12 -917-21**, National Institute of standards and technology, U.S. Department of commerce 2012.
- [7] **FEMA P-2091**, « A Practical Guide to Soil-Structure Interaction » FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY.
- [8] **Ikhlassé Kheira Asmouni<sup>1</sup>, Mohammed Mekki, Mohammed Bensafi**, Seismic Behavior of Colliding Buildings, Incorporating Soil-structure Interaction and Accounting for Variability in Structural Parameters, Soil Parameters, and Seismic Action (2023), <https://doi.org/10.3311/PPci.22921>
- [9] **Mahmoud Miari, Kok Keong Choong, Robert Jankowski**, Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 121 (2019) 135–150, journal Elsevier.
- [10] **ASCE 7-** American Society of Civil Engineers Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (2010).

- [11] **Gazetas et Mylonakis**, Seismic soil-structure interaction: New evidence and emerging issues, *Geotechnical Special Publication* 2(75):1119-1174, ResearchGate (1998, 2000).
- [12] **Boris Jeremić, Kallol Sett et James Putnam**, Calibration of Elastic-Plastic Material Model for Tire Shreds, ResearchGate, 2004, <http://sokocalo.engr.ucdavis.edu/~jeremic>
- [13] **Eduardo A. Kausel**, Early history of soil–structure interaction, September 2010 *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30(9):822-832.
- [14] **B. Madani, F. Behnam far, n, H. Tajmir Riahi**, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 78 (2015) 46–60 journal homepage: [www.elsevier.com/locate/soildyn](http://www.elsevier.com/locate/soildyn).
- [15] **Chinmayi**, Study on Pounding of Structures with Soil–Structure Interaction Effects: A Review, *J. Inst. Eng. India Ser. A* (March 2019) 100(1):199–204 <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0341-4>
- [16] **Sobhi and Far**, Impact of structural pounding on structural behavior of adjacent buildings considering dynamic soil-structure interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering* (2022) 20:3515–3547, <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01195-w>
- [17] **Rohit K. Pote, Nilesh U. Mate**, Structural pounding of three adjacent multi degree of freedom system under subsurface blast and seismic action by considering and ignoring the effect of soil structure interaction (2023), journal Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.359>.
- [18] **Mohammed El Hoseny, Davide Forcellini, Jianxun M**, The role of the foundation gap on the pounding between low-rise buildings, *Structures* 63 (2024) 106412, journal Elsevier.
- [19] **Veletsos A.S. and V.V.D. Nair**, Seismic interaction of structures on hysteretic foundations., *J. Struct. Engrg. ASCE*, Vol. 101, n°1, pp 109-129, 1975.
- [20] **Bielak, J.** Dynamic behavior of structures with embedded foundations., *J. Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, Vol 3, n°3, pp 259- 274, 1975.
- [21] **RPA-99/version (2003)**, « Règles parasismiques Algériennes 1999 version 2003 », DTR-BC 248 Centre National de Recherche Appliquée en Génie sismique (CGS), Alger, 2004”, 117p.
- [22] **FEMA P-750 /2009 Edition « NEHRP Recommended seismic provisions »**