

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Direction de la Post-Graduation et de la Recherche Scientifique



Mémoire de magister

Option : Matériaux et Structure

Présenté par

RAFA Bilal

Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Diplômé de l'université Dr. Yahia Fares de Médea

Sur le thème

INVESTIGATION NUMERIQUE SUR L'EFFET DE L'ENTRECHOQUEMENT ENTRE LES STRUCTURES ADJACENTES

Soutenu le 07/05/2014, devant le jury composé de:

A.ZERZOUR	Professeur	ENSTP	Président
H.BECHTOULA	Maître de recherche A	CGS	Rapporteur
C.BENAZOUZ	Maître de recherche B	CGS	Co-rapporteur
M.LEBLOUBA	Maître de conférences B	ENSTP	Examineur
N.MEZOUER	Maître de recherche A	CGS	Examineur
Y.MEHANI	Maître de recherche A	CGS	Examineur

REMERCIEMENTS

D'abord et avant tout, je dois remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la force et la patience pour achever mon travail.

Je remercie mon directeur de thèse *Dr BECHTOULA Hakim*, Maitre de recherche A au Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) pour la confiance et le soutien qu'il m'a accordé.

Je tiens à remercier fortement mon co-directeur de thèse *Dr CHIKH Benazouz*, Maitre de recherche B au CGS. Je vous remercie pour la proposition de ce sujet de recherche, et pour m'avoir guidé durant toutes nos rencontres fructueuses sur le sujet de ce travail et pour l'avoir inspiré et encadré avec une rigueur qui me fut toujours profitable.

Un grand merci à Mr. ZERZOUR Ali, professeur à l'ENSTP, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire et de m'avoir bien accueilli au sein de son établissement.

Je remercie Mr. LEBLOUBA Moussa, Maître de conférences B à l'ENSTP, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de faire partie de mon jury.

Je remercie Mr. MEZOUER Nouredine, Maître de recherche A au CGS, d'avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire, que vous trouviez ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie vivement Mr. MEHANI Youcef, Maître de recherche A au CGS, Je suis très reconnaissant à vous pour votre acceptation d'être un membre de mon jury et d'avoir consacré leur temps précieux pour examiner mon mémoire.

Je témoigne également ma parfaite reconnaissance, à l'ensemble du personnel du laboratoire de recherche de l'ENSTP, notamment Rachida, pour les moyens qui ont été mis à ma disposition durant toute la durée de la formation.

Enfin, je tiens à remercier ma mère, mon père, mes sœurs et mon frère, mes amis, qui m'ont soutenu durant cette période.

الملخص

الهدف من هذه الرسالة هو دراسة تأثير التصادم بين البنايات المتجاورة و ذلك بالتحليل الديناميكي غير الخطي باستعمال طريقة عنصر الإتصال . استعملنا نوعين من البنايات, التقليدية و المعزولة في القاعدة . الهدف الرئيسي هو دراسة استجابة البنايات في ظل حالة التصادم و تقييم المسافة الفاصلة بين الهياكل المتجاورة .

الكلمات الرئيسية : التصادم, التحليل الديناميكي غير الخطي, عنصر الإتصال, المسافة الفاصلة

RESUME

L'objectif de ce travail consiste à étudier l'effet de l'entrechoquement entre les structures adjacentes à travers une analyse dynamique non-linéaire par accélérogramme en utilisant l'approche de l'élément de contact. Deux types de structures sont considérées, conventionnelles et isolées à la base. Le but principal est d'étudier la réponse structurelle sous la condition de l'entrechoquement et l'évaluation de la distance de séparation entre les structures adjacentes.

Mots clés : Entrechoquement, Analyse dynamique non-linéaire, Élément de contact, Distance de séparation.

SUMMARY

The objective of this work is to study the effect of pounding between adjacent structures through a non linear time history analysis (NTHA) with the impact model approach. Two types of structures are considered fixed and isolated at the base. The main purpose is to study the structural response under the condition of pounding and evaluation of the separation distance between adjacent structures.

Key words: Pounding, Non linear time history analysis (NTHA), Impact model, Separation distance.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

1

I. EFFET DE L'ENTRECHOQUEMENT ENTRE LES STRUCTURES ADJACENTES

I.1 Introduction	3
I.2 Définition du phénomène de l'entrechoquement	4
I.3 Configurations des bâtiments les plus vulnérables à l'entrechoquement	4
I.4 Observations des dommages dus à l'entrechoquement des séismes passés	6
I.4.1 Observations algériennes	6
I.4.1.1 Bâtiments adjacents avec de hauteur différente et avec différente hauteur d'étage	6
I.4.1.2 Bâtiments adjacents avec même hauteur et même niveau d'étage	7
I.4.2 Observations mondiales	7
I.4.2.1 Bâtiments dans une rangée	7
I.4.2.2 Bâtiments adjacents avec différente hauteur et même niveau d'étage	8
I.5 Méthodes de réduction de l'entrechoquement	9
I.6 Joint sismique	10
I.6.1 Evaluation des épaisseurs des joints sismiques selon les règlements parasismiques	11
I.6.1.1 Règle parasismique algérienne (RPA 99/Version 2003)	11
I.6.1.2 Eurocode 8	12
I.6.1.3 Code du bâtiment uniforme (UBC 1997)	13
I.6.1.4 Code internationale du bâtiment (IBC 2000)	14
I.6.1.5 Agence Fédérale de gestion des catastrophes (FEMA 273-1997)	15
I.6.2 Méthodes de calcul des épaisseurs des joints sismiques	15

I.6.2.1 Méthode de la différence spectrale	15
I.7 Mécanisme du transfert de l'énergie au cours de l'entrechoquement	16
I.7.1 Modèles analytiques pour l'évaluation de l'entrechoquement	19
I.7.1.1 Méthode de l'élément de contact	18
I.7.1.2 Modèle stéréo-mécanique	19
I.8 Conclusion	21

II. EFFET DE L'ENTRECHOQUEMENT ENTRE LES STRUCTURES ISOLEES A LA BASE

II.1 Introduction	22
II.2 Définition de l'isolation à la base	23
II.3 Objectif de l'isolation sismique	23
II.4 Différents types d'appuis parasismiques	24
II.4.1 Appuis à déformation	24
II.4.2 Appuis à glissement	25
II.5 Fonctionnement et modélisation des appuis parasismiques	26
II.5.1 Système en caoutchouc avec amortisseur en tige de plomb (LRB)	26
II.5.2 Système à frottement pur (pure friction system ; PF)	27
II.6 Endroits les plus vulnérables à l'entrechoquement	28
II.6.1 Entrechoquement au niveau de la base	28
II.6.2 Entrechoquement au niveau des planchers	28
II.7 Evaluation de la distance de séparation selon les codes parasismiques	29
II.7.1 Code international du bâtiment (IBC 2000)	30
II.7.2 Code du bâtiment uniforme (UBC 1997)	30
II.8 Formulation mathématique de l'effet de l'entrechoquement	30
II.8.1 Bâtiments encastrés à la base à un seul degré de liberté	31
II.8.2 Bâtiments isolés à la base à un seul degré de liberté	33

II.9 Conclusion	36
-----------------	----

III. EVALUATION DE LA DISTANCE DE SEPARATION ENTRE LES STRUCTURES ENCASTREES A LA BASE

III.1 Introduction	37
III.2 Formulation de l'analyse dynamique non-linéaire	38
III.3 Description des structures étudiées	39
III.4 Modélisation de la structure	40
III.4.1 Analyse et interprétation des résultats	41
III.4.1.1 Analyse modale	41
III.4.1.2 Analyse dynamique non- linéaire par accélérogramme	42
III.5 Estimation de la distance de séparation	45
III.6 Simulation de la force de contact entre les structures	47
III.7 Influence de l'accélération du sol (PGA)	50
III.8 Conclusion	53

IV. EVALUATION DE LA DISTANCE DE SEPARATION ENTRE LES STRUCTURES ISOLEES A LA BASE

IV.1 Introduction	54
IV.2 Modélisation de la structure	55
IV.3 Modélisation du système d'isolation sismique	55
IV.4. Analyse et interprétation des résultats	56
IV.4.1 Analyse modale	56
IV.4.2 Analyse dynamique non- linéaire par accélérogramme	57
IV.5 Estimation de la distance de séparation	59
IV.6 Simulation de la force de contact entre les structures	61
IV.7 Influence de l'accélération du sol (PGA)	64
IV.8 Conclusion	66

V. COMPARAISON ENTRE LES CODES PARASISMIQUES

V.1 Introduction	67
V.2 Revue sur les dispositions des codes	68
V.3 Distance de séparation minimale entre les bâtiments	69
V.4 Résultats de l'étude	72
V.5 Conclusion	74

CONCLUSION GENERALE	75
----------------------------	-----------

ANNEXE

I. Dimensionnements et lois de comportement des appuis parasismiques	78
II. Liste sur les dispositions de calcul de la distance de séparation selon certains codes	78

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	80
------------------------------------	-----------

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

- Fig. 1.1 Schéma des structures les plus vulnérables à l'entrechoquement.
- Fig. 1.2 Dommages aux poteaux dus à l'entrechoquement (le séisme de Boumerdes 21 May 2003).
- Fig. 1.3 Ouverture entre deux Bâtiments (Boumerdes, 2003).
- Fig. 1.4 Bâtiment commercial entre deux bâtiments adjacents rigides.
- Fig. 1.5 Dommages entre un bâtiment de 10 étages et un autre de 5 étages.
- Fig. 1.6 Deux structures adjacentes séparées par un joint sismique.
- Fig. 1.7 Largeur minimum du joint sismique selon RPA 99/Version 2003.
- Fig. 1.8 (a) Joints sismiques des bâtiments adjacents avec des propriétés différentes.
(b) Joint sismique des bâtiments adjacents avec des propriétés identiques.
- Fig. 1.9 Déplacement inélastique maximum du bâtiment.
- Fig. 1.10 (a) Élément de contact, (b) Comportement de l'entrechoquement de l'élément de contact.
- Fig. 1.11 Modèle stéréo-mécanique, (a) Avant d'impact, (b) Après d'impact.

Chapitre 2

- Fig. 2.1 Principe de l'isolation sismique.
- Fig. 2.2 Appui en élastomère fretté avec tige de plomb (LRB).
- Fig. 2.3 Appui en pendule glissant.
- Fig. 2.4 (a) Modèle mathématique, (b) Relation force-déplacement.
- Fig. 2.5 (a) Modèle mathématique, (b) Relation force-déplacement.
- Fig. 2.6 (a) Structure isolée au voisinage d'un mur de soutènement (impact au niveau à la base),
(b) Structure isolée au voisinage d'une structure conventionnelle (impact au niveau des planchers).
- Fig. 2.7 Schéma de deux bâtiments adjacents à un seul degré de liberté.
- Fig. 2.8 Diagramme des forces agissant sur la masse (m_1).
- Fig. 2.9 Diagramme des forces agissant sur la masse (m_2).
- Fig. 2.10 Deux bâtiments montés sur un appui à frottement pur.

Chapitre 3

Fig. 3.1 Vue en élévation avec dimensions des structures étudiées. (a) : 8 Niveaux (SP8), (b) : 6 Niveaux (SP6), (c) : 3 Niveaux (SP3).

Fig. 3.2 Modélisation en masses concentrées des structures étudiées.

Fig. 3.3 Accélérogramme du séisme d'El-Centro 1940.

Fig. 3.4 Variation temporelle du déplacement au niveau 3 des deux structures (SP8-SP3).

Fig. 3.5 Variation temporelle du déplacement au niveau 6 des deux structures (SP8-SP6).

Fig. 3.6 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP3).

Fig. 3.7 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP6).

Fig. 3.8 Vue en élévation des deux structures adjacentes, (a) (SP8-SP3), (b) (SP8-SP6).

Fig. 3.9 Ampleur de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de séparation entre (SP3-SP8).

Fig. 3.10 Ampleur de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de séparation entre (SP6-SP8).

Fig. 3.11 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation.

Fig. 3.12 Variation de la distance de séparation en fonction du PGA (Accélération maximale du sol).

Fig. 3.13 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP3-SP8).

Fig. 3.14 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP6-SP8).

Chapitre 4

Fig. 4.1 Modélisation en éléments finis des structures, (a) : 8 Niveaux (SP8), (b) : 6 Niveaux (SP6), (c) : 3 Niveaux (SP3).

Fig. 4.2 Modélisation bilinéaire du comportement du système d'isolation.

Fig. 4.3 Variation temporelle du déplacement au niveau 3 des deux structures (SP8-SP3).

Fig. 4.4 Variation temporelle du déplacement au niveau 6 des deux structures (SP8-SP6).

Fig. 4.5 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP3).

Fig. 4.6 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP6).

Fig. 4.7 Vue en élévation des deux structures adjacentes, (a) (SP8-SP3), (b) (SP8-SP6).

Fig. 4.8 Ampleur de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de séparation entre (SP3-SP8).

Fig. 4.9 Ampleur de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de séparation entre (SP6-SP8).

Fig. 4.10 Variation du nombre total de contacts en fonction de la distance de séparation.

Fig. 4.11 Variation de la distance de séparation en fonction du PGA.

Fig. 4.12 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP3-SP8).

Fig. 4.13 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP6-SP8).

Chapitre 5

Fig. 5.1 Modèle idéalisé des deux systèmes à un seul degré de liberté.

Fig. 5.2 Espace minimal entre deux structures ayant des propriétés dynamiques différentes.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 3

Tableau 3.1 Dimensions des sections transversales des éléments structuraux du portique (SP8).

Tableau 3.2 Dimensions des sections transversales des éléments structuraux du portique (SP6).

Tableau 3.3 Dimensions des sections transversales des éléments structuraux du portique (SP3).

Tableau 3.4 Caractéristiques du matériau de construction.

Tableau 3.5 Résultats de l'analyse modale du portique (SP8).

Tableau 3.6 Résultats de l'analyse modale du portique (SP6).

Tableau 3.7 Résultats de l'analyse modale du portique (SP3).

Tableau 3.8 Valeurs de la distance de séparation entre (SP8-SP3) et (SP8-SP6).

Tableau 3.9 Résultats de la simulation de la force de contact (SP3-SP8).

Tableau 3.10 Résultats de la simulation de la force de contact (SP6-SP8).

Chapitre 4

Tableau 4.1 Résultats de l'analyse modale du portique (SP8).

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse modale du portique (SP6).

Tableau 4.3 Résultats de l'analyse modale du portique (SP6).

Tableau 4.4 Valeurs de la distance de séparation entre (SP8-SP3) et (SP8-SP6).

Tableau 4.5 Résultats de la simulation de la force de contact (SP3-SP8).

Tableau 4.6 Résultats de la simulation de la force de contact (SP6-SP8).

Chapitre 5

Tableau 5.1 Détails sur les formules de calcul de la distance de séparation selon certains codes.

Tableau 5.2 Détails sur: Masses, rigidité et la Distance de séparation entre deux bâtiments.

Tableau 5.3 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents ayant des périodes de temps T_1 , T_2 , selon certains codes (PGA= 0.318 (g)).

Tableau 5.4 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents soumis une accélération maximale PGA= 0.636 (g).

Tableau 5.5 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents soumis une accélération maximale PGA= 0.954 (g).

Tableau 5.6 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents soumis une accélération maximale PGA= 1.272 (g).

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours d'un tremblement de terre, des structures adjacentes ayant des caractéristiques dynamiques différentes peuvent vibrer en hors phase qui engendrant le phénomène de l'entrechoquement (martèlement), si la séparation entre ces structures adjacentes est insuffisante pour accommoder le mouvement relatif [17]. Cet entrechoquement éventuel introduit des efforts d'impact non pris en compte dans le projet initial ; ils vont se superposer à ceux qui résultent de l'excitation sismique proprement dite. Selon les caractéristiques dynamiques des structures adjacentes, l'entrechoquement pourrait causer des dommages structurels graves dans certains cas ou même la possibilité de l'effondrement complet des structures dans certaines situations extrêmes.

La méthode la plus simple et la plus couramment adoptée dans les règlements parasismiques pour protéger les bâtiments avoisinants contre l'entrechoquement est de fournir une largeur minimale (joint sismique). La valeur de la distance de séparation ou l'espace critique (d_{min}) doit être suffisamment grande pour éviter le risque de contact. Selon les codes parasismiques, cette valeur dépend principalement du déplacement dû aux forces sismiques.

Position du problème et objectifs

L'entrechoquement entre des structures adjacentes est un phénomène très complexe, ce qui peut conduire à des déformations plastiques aux points de contact. Ces déformations plastiques sont difficiles à incorporer dans la modélisation numérique. En raison de cette complexité, la modélisation de l'impact est une tâche extrêmement difficile. Par conséquent, des hypothèses sont employées dans les modèles théoriques qui utilisent l'approche de l'élément de contact, qui peut fournir une meilleure approximation du problème réel. Pour étudier le comportement des structures dû à l'entrechoquement, une meilleure conception parasismique devrait tenir compte de la réponse des structures calculée au moyen d'une analyse dynamique non-linéaire.

L'objectif de cette étude, est la modélisation mathématique des structures adjacentes incluant l'effet de l'entrechoquement basée sur l'approche de l'élément de contact. L'analyse considère des structures adjacentes avec différente hauteur et avec des hauteurs d'étage

identiques. Le comportement des structures est supposé non-linéaire. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'effet de martèlement sur la réponse globale des structures, pour déterminer une méthode simple et appropriée pour les nouvelles structures pour fournir aux ingénieurs des outils d'analyse pratiques pour prédire le dommage lié à l'entrechoquement. Un modèle réaliste d'un élément de contact est utilisé pour étudier la réponse structurelle sous la condition de martèlement au cours d'un séisme, où cet élément est activé quand les structures adjacentes seront rentrées en contact. Egalement, une estimation de la distance de séparation minimale est évaluée par les règles de la somme des déplacements absolus (ABS) et la règle de la racine carrée de la somme des carrés (SRSS), qui sont utilisées dans le code de bâtiment international (IBC 2000) et par la méthode de la différence spectrale ou bien la règle de la double différence (DDC) (proposée par Jeng, Kasai et Maison 1992), pour estimer le degré d'exactitude de chaque règle dans le domaine non-linéaire.

Méthodologie du travail

La méthodologie adoptée consiste à diviser le travail en cinq chapitres :

Le premier chapitre est une recherche nécessaire pour comprendre le comportement des structures adjacentes dû à l'entrechoquement. Ce chapitre comporte des généralités sur le phénomène de l'entrechoquement et leurs méthodes d'atténuation et les règles d'évaluation de la distance de séparation minimale selon les codes parasismiques. On explicite aussi dans ce chapitre les méthodes de modélisation mathématique de ce phénomène.

Le deuxième chapitre présente des notions générales sur les systèmes d'isolation sismique. On présente aussi une formulation de l'équation du mouvement du système à un seul degré de liberté avec une base fixe et avec un système d'isolation sismique incluant l'effet de contact.

Dans le troisième chapitre, une application numérique à l'aide du programme IDARC v6.1 (développé par Valles et al, 1996) est consacrée à l'évaluation de la distance de séparation entre deux structures adjacentes, basée sur l'analyse dynamique non-linéaire et la simulation de l'ampleur de la force de contact à l'aide d'un élément de contact linéaire.

Dans le quatrième chapitre, une application numérique à l'aide du programme ETABS v.9.0, vise principalement à étudier l'influence de l'entrechoquement sur la performance des systèmes d'isolation sismique.

Enfin, le cinquième chapitre est consacré à une comparaison entre les formules de calcul de la distance de séparation minimale selon certains codes parasismiques.

CHAPITRE I

EFFET DE L'ENTRECHOQUEMENT ENTRE LES STRUCTURES ADJACENTES

Chapitre I EFFET DE L'ENTRECHOQUEMENT ENTRE LES STRUCTURES ADJACENTES

I.1 Introduction

Le mouvement horizontal d'un bâtiment au cours d'un séisme peut entraîner des chocs avec les bâtiments voisins lorsque l'espacement entre ceux-ci n'est pas suffisant. Ces chocs pourraient causer des dommages structurels et non-structurels. Pour éviter ce phénomène, la manière la plus simple et efficace consiste à assurer une séparation suffisante entre les structures adjacentes. Pour cela, un espace minimal est spécifié dans la plupart des règlements parasismiques pour les nouvelles structures, comme le règlement algérien RPA 99/Version2003 qui a imposé une clause pour prendre une disposition de la séparation suffisante entre les structures adjacentes. Par ailleurs, les observations des séismes récents ont montré plusieurs cas d'effondrement structural qui se sont produits à cause de l'entrechoquement, malgré ces derniers aient été conçues selon les règles en vigueur de la conception parasismique.

Dans ce chapitre, on va expliquer le phénomène de l'entrechoquement et leurs méthodes d'atténuation, ensuite on va présenter les différentes réglementations et les méthodes récentes pour déterminer l'épaisseur du joint sismique.

I.2 Définition du phénomène de l'entrechoquement

L'effet de l'entrechoquement consiste seulement à un transfert d'énergie entre les structures. En raison de l'emprise dynamique au cours d'un séisme, les bâtiments voisins qui sont proches les uns des autres sans assez de séparation, entraînent des collisions latérales. Ils produisent une forte amplitude et des impulsions d'accélération de courte durée où l'énergie est dissipée sous forme de chaleur à cause des vibrations moléculaires aléatoires et le frottement interne des corps. Cette force de contact peut amplifier la réponse globale de la structure et causer des dommages structuraux [1]. Par ailleurs, cette force de contact dépend de nombreux paramètres comme la vitesse des structures, la distance de séparation entre eux et la rigidité des deux structures. L'effet de l'entrechoquement peut se produire principalement entre les planchers ou à mi-hauteur des poteaux.

I.3 Configurations des bâtiments les plus vulnérables à l'entrechoquement

Les observations des séismes précédents montrent que les configurations des structures les plus vulnérables au phénomène de l'entrechoquement sont identifiées en cinq configurations.

- **Entrechoquement entre plancher et poteau (fig. 1.1-a) :** Ce type se produit dans les bâtiments adjacents avec des hauteurs d'étages différentes, en cas d'un déplacement horizontal important du bâtiment. Il y a un risque de choc entre le plancher du bâtiment à droite et les poteaux ou voiles du bâtiment à gauche. Dans ce cas, les poteaux sont sujets à des forces de cisaillement très élevées, qui peuvent mener à une rupture à mi-hauteur de ces éléments structuraux.

- **Entrechoquement des bâtiments adjacents avec différentes masses (fig.1.1-b) :**

Lorsque les bâtiments adjacents ont des masses différentes; qui peuvent provoquer des vibrations en hors phase, le transfert de la quantité de mouvement à partir du bâtiment le plus lourd peut considérablement augmenter la vitesse dans le bâtiment plus léger pendant l'impact. En conséquence, le bâtiment léger est susceptible à l'effondrement.

- **Entrechoquement des bâtiments adjacents avec différentes hauteurs (fig.1.1-c) :**

Lorsque deux bâtiments adjacents n'ont pas de la même hauteur, ce qui provoque des vibrations en hors phase, la structure la moins élevée rentre en choc avec le plancher de la

structure la plus élevée. Ceci crée une augmentation importante de l'effort tranchant dans l'étage immédiatement au-dessus de l'étage supérieur du bâtiment court. Qui peut conduire à la rupture des poteaux.

- Entrechoquement entre des bâtiments similaires dans une rangée (fig.1.1-d) :

Ce type d'impact se produit dans les bâtiments similaires dans une rangée, pendant les séismes majeurs, lorsque les structures adjacentes vibrent en phase. Dans ce cas, les bâtiments d'extrémités subissent des dommages graves en raison du transfert de la quantité de mouvement à partir des bâtiments intérieurs [2].

- Entrechoquement des bâtiments avec une structure antisymétrique (martèlement de torsion) (fig.1.1-e) :

Certaines configurations de bâtiments peuvent exciter des modes de torsion dans une ou deux structures, ce qui peut conduire à d'importants déplacements relatifs entre le pied et la tête des colonnes les plus éloignées du centre de rigidité, et cela peut mener à des dommages dans les poteaux sur les bords et les coins du bâtiment.

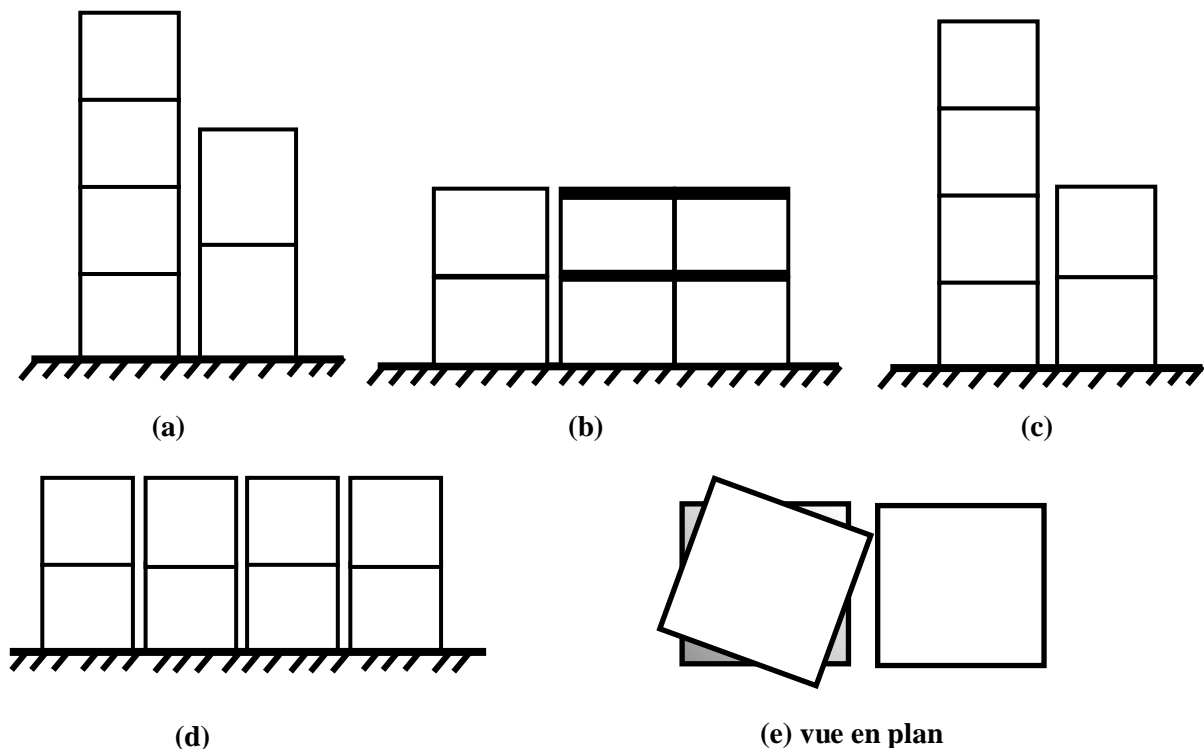


Fig.1.1 Schéma des structures les plus vulnérables à l'entrechoquement.

I.4 Observations des dommages dus à l'entrechoquement des séismes passés

Pendant les séismes passés, des dommages dus au martèlement ont été remarqués dans les bâtiments et les ponts. Plusieurs cas observés sur l'entrechoquement structural sont énumérés ci-dessous :

I.4.1 Observations algériennes

Les observations sur l'entrechoquement des séismes algériens sont comme suit:

I.4.1.1 Bâtiments adjacents avec de hauteur différente et avec différent d'étage

Lors du séisme de Boumerdes qui a frappé le nord de l'Algérie le 21 mai 2003, l'insuffisance de l'épaisseur des joints sismiques a causé de dommages dans les poteaux.

Comme le montre la (fig.1.2) par bechtoula et ousalem [2005], le niveau des dommages était moindre pour les structures à portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide que pour les structures autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide [3].



Fig.1.2 Dommages des poteaux dus à l'entrechoquement (le séisme de Boumerdes 21 May 2003) [3].

Dans ce cas, les planchers d'un bâtiment peuvent entrer en collision avec les poteaux de l'autre bâtiment, provoquant la rupture des poteaux à cause de l'effort tranchant important. C'est probablement le cas le plus critique de l'interaction entre les bâtiments adjacents.

I.4.1.2 Bâtiments adjacents avec même hauteur et même niveau d'étage

Davidovici [2003] a rapporté des effets dus au martèlement entre les structures observées pendant le séisme de Boumerdes en 2003, où la (fig.1.3) montre une ouverture observée entre deux bâtiments due au martèlement [4].

Ce cas est compris entre deux bâtiments de mêmes hauteurs et avec même hauteur d'étage. La collision peut se produire par le mécanisme de la conservation de la quantité de mouvement dans les points de contact entre les diaphragmes, à cause de l'insuffisance de l'épaisseur du joint sismique.



Fig.1.3 Ouverture entre deux bâtiments (Boumerdes, 2003) [4].

Dans ce cas, le degré de dommages est faible par rapport aux autres configurations, parce que les chocs locaux ont lieu entre les diaphragmes horizontaux.

I.4.2 Observations mondiales

Les observations sur l'entrechoquement des séismes mondiaux sont comme suit:

I.4.2.1 Bâtiments dans une rangée

Quand plusieurs bâtiments sont construits en série, formant une rangée, ils peuvent être endommagés en raison du mouvement apporté par les bâtiments adjacents, par exemple, un immeuble commercial a été endommagé pendant le tremblement de terre de Mexico

septembre 1985 (fig.1.4) [5]. Dans cet immeuble, les forces de contact ont causé de l'effondrement de la partie supérieure.



Fig.1.4 Bâtiment commercial entre deux bâtiments adjacents rigides [5].

Pour les bâtiments en série, l'effet de pendule cause un large mouvement et un endommagement aux bâtiments d'extrémités dû à la masse accumulée de tous les autres bâtiments en série. Dans ce cas, le dernier bâtiment de la rangée se martèle d'un côté seulement tout en étant libre pour se déplacer de l'autre côté. Par contre, le bâtiment du milieu se martèle des deux côtés. Il n'est pas libre de se déplacer excessivement dans l'une ou l'autre direction. Ce qui peut produire l'endommagement aux structures d'extrémités.

I.4.2.2 Bâtiments adjacents avec différente hauteur et même niveau d'étage

Dans ce cas, l'entrechoquement est produit entre deux bâtiments adjacents, ayant de hauteurs différentes, avec même niveau d'étage. Des dommages entre un bâtiment de 10 étages et un autre de 05 étages sont montrés à la (fig.1.5), puisque seulement 1 à 3,81 centimètres de séparation est présente [6].

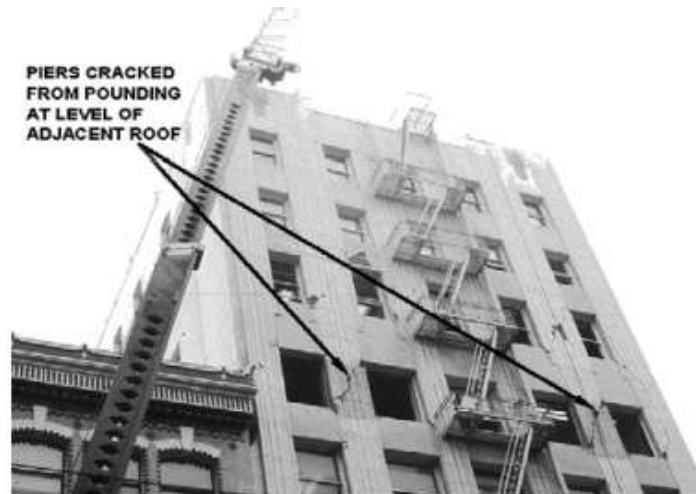


Fig.1.5 Dommages entre un bâtiment de 10 étages et un autre de 5 étages [6].

Le bâtiment de 10 étages construit en 1904 avec des murs en maçonnerie épais (33 cm d'épaisseur) combinés avec 9 poutres en acier. Le bâtiment de 5 étages est en béton armé ayant un mur très rigide au 2^{ème} niveau, et il a été renforcé en ajoutant des anneaux en acier en 1980. Cette observation montre que le dommage a été situé au niveau de la toiture du bâtiment de 5 étages avec de grandes fissures diagonales dans les murs en maçonnerie du bâtiment de 10 étages [6].

I.5 Méthodes de réduction de l'entrechoquement

L'entrechoquement conduit à des forces de contact qui doivent être superposées à celles provoquées par l'accélération du sol. Ces forces de contact peuvent influencer sur la réponse globale de la structure. Plusieurs méthodes ont été proposées pour éviter ou minimiser les dommages structurels. Les méthodes de réduction seront utilisées pour les structures nouvelles ou existantes. Elles sont comme suit:

- Fournir une épaisseur minimale suffisante entre les structures adjacentes : cette méthode est utilisée dans la plupart des règlements parasismiques mondiaux, les joints sismiques doivent avoir une certaine largeur minimale pour éviter ou limiter le problème d'entrechoquement.
- Méthodes de synchronisation des périodes fondamentales : cette méthode consiste à renforcer les structures adjacentes de telle manière à ce qu'elles des périodes fondamentales presque identiques afin de vibrer en phase [7].

- Méthodes d'incorporation des dissipateurs d'énergies : cette méthode consiste à lier deux structures adjacentes par des amortisseurs, qui réduisent le transfert de l'énergie par formation des boucles hystérésis.
- Méthode debrélage: cette solution est basée sur la technique du brélage, qui consiste à relier les structures adjacentes par des liaisons rigides afin d'obtenir l'équivalence d'un seul bloc. La suppression du joint sismique permet d'obtenir un bloc unique de plus grande dimension, dont les caractéristiques (raideurs, déplacements, etc...) sont favorables à la transmission des actions sismiques [8].

Les méthodes de réduction peuvent être classées en fonction de leur approche du problème de l'entrechoquement. Mais pour notre travail, nous nous sommes intéressés à la méthode de la séparation sismique entre deux structures adjacentes.

I.6 Joint sismique

La méthode la plus simple et la plus couramment adoptée dans les règlements parasismiques pour protéger les bâtiments avoisinants contre l'entrechoquement est de fournir une épaisseur minimale (joint sismique). La valeur de la distance de séparation ou l'espace critique (d_{min}) (fig1.6), doit être suffisamment grande pour éviter le risque de contact. Il est donc nécessaire de les séparer par un joint vide de tout matériau afin de supprimer toute interaction structurale, présente sur toute la hauteur de la superstructure ou parties de bâtiments qu'il sépare.

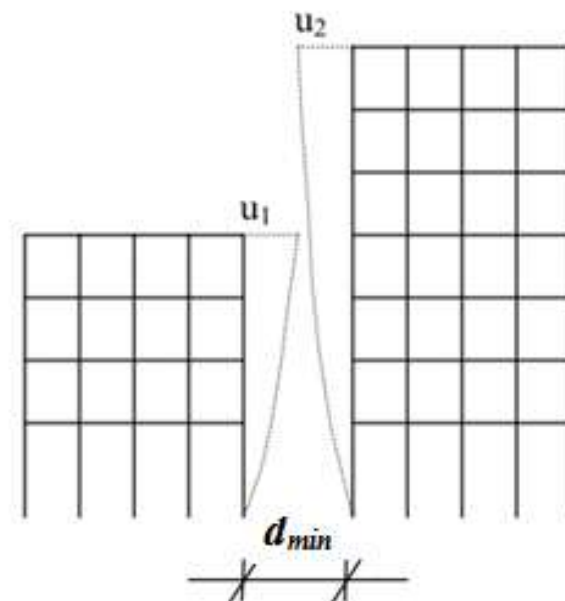


Fig. 1.6 Deux structures adjacentes séparées par un joint sismique.

La valeur de l'épaisseur du joint sismique est adoptée dans la plupart des règlements parasismiques par la somme des déplacements maximaux de chaque bloc. Par ailleurs, divers auteurs ont étudié différentes méthodes pour évaluer la largeur de la séparation qui est généralement moins conservatrice que les prescriptions des règlements.

I.6.1 Evaluation des épaisseurs des joints sismiques selon les règlements parasismiques

Les règlements parasismiques dans le monde attirent l'attention sur le problème de l'entrechoquement. L'approche généralement adoptée dans les règlements est de fournir une épaisseur minimale entre les bâtiments adjacents. Par ailleurs, la procédure pour déterminer l'épaisseur minimale varie selon les pays. Par exemple, pour les USA, cela dépend des déplacements maximums de chaque bâtiment. À Taiwan, elle est en fonction de la hauteur du bâtiment ; en Argentine l'épaisseur minimale est fixée de 2,5 cm. En outre, dans certains cas, ces valeurs dépendent de la nature du sol et de l'action sismique [9].

I.6.1.1 Règle parasismique algérienne (RPA 99/Version 2003)

Deux blocs voisins doivent être séparés par des joints sismiques dont la largeur minimale d_{\min} satisfait la condition suivante (clause 5.8) :

$$d_{\min} = 15_{\text{mm}} + (\delta_1 + \delta_2)_{\text{mm}} \quad (1.1)$$

δ_1 et δ_2 : Déplacements maximaux des deux blocs, calculés selon (clause 4.43) au niveau du sommet du bloc le moins élevé incluant les composantes dues à la torsion et éventuellement celles dues à la rotation des fondations (Fig. 1.7) [10].

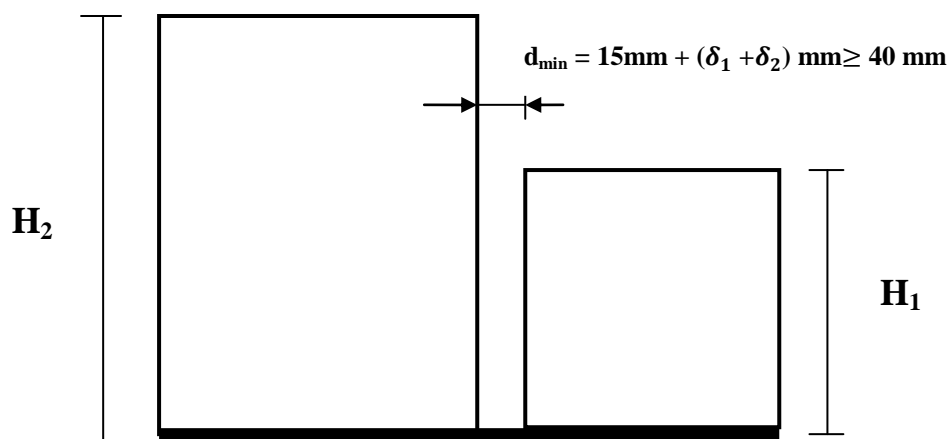


Fig. 1.7 Largeur minimum du joint sismique selon RPA 99/Version 2003.

• **Calcul du déplacement selon la (clause 4.43)**

Le déplacement horizontal à chaque niveau K de la structure est calculé comme suit :

$$\delta_K = R\delta_{eK} \quad (1.2)$$

δ_{ek} : Déplacement du aux forces sismiques F_i (y compris l'effet de torsion).

R : Coefficient de comportement.

I.6.1.2 Eurocode 8

L'Eurocode 8 préconise des joints de séparation entre blocs ou bâtiments voisins pour que les bâtiments soient protégés contre l'entrechoquement avec les bâtiments adjacents ou entre des unités structurellement indépendantes du même bâtiment. Pour cela, il faut :

- Pour les bâtiments, ou unités structurellement indépendantes, qui n'appartenant pas à la même propriété, la distance entre la ligne de séparation théorique entre blocs et les points d'impact potentiels ne doit pas inférieure au déplacement horizontal maximal du bâtiment au niveau correspondant, calculé par l'expression (1.3), selon la (clause 4.3.4).
- Pour les bâtiments, ou unités structurellement indépendantes, qui appartenant à la même propriété, la distance entre eux ne doit pas inférieure à la racine carrée de la somme des carrées (SRSS) des déplacements horizontaux maximaux des deux bâtiments ou unités au niveau correspondant, calculé par l'expression (1.3), selon la (clause 4.3.4).

Une spécification est faite : Si les niveaux des planchers d'un bâtiment en cours d'étude sont les mêmes que ceux du bâtiment adjacents, la distance citée ci-dessus peut être réduite par un coefficient (0,7) [11].

• **Calcul du déplacement selon la (clause 4.3.4)**

Les déplacements produits par l'action sismique doivent être calculés sur la base de la déformation élastique du système structural, à l'aide de la relation simplifiée suivante :

$$d_s = q_d d_e \quad (1.3)$$

d_s : Déplacement d'un point du système structural dû à l'action sismique de calcul.

q_d : Coefficient de comportement.

d_e : Déplacement du même point du système structural, déterminé par une analyse linéaire basée sur le spectre de réponse de calcul.

I.6.1.3 Code du bâtiment uniforme (UBC 1997)

Toutes les structures adjacentes seront séparées par une épaisseur suffisante entre elles. Les déplacements des structures doivent permettre le déplacement non-linéaire Δ_M [12].

Pour les bâtiments adjacents appartenant à la même propriété, ils doivent être séparés par une distance minimale Δ_{MT} (fig.1.8-a), calculée par l'expression (1.4), selon la (clause 1633.2.11).

$$\Delta_{MT} = \sqrt{\Delta_{MA}^2 + \Delta_{MB}^2} \quad (1.4)$$

Pour les bâtiments adjacents n'appartenant pas à la même propriété (fig.1.8-b), la distance de séparation sera calculée par la formule suivante:

$$\Delta_{MT} = \Delta_{MA} + \Delta_{MB} \quad (1.5)$$

Avec :

Δ_{MA} et Δ_{MB} : Ce sont les déplacements des bâtiments adjacents.

• Calcul du déplacement selon la (clause 1630.9.2)

Le déplacement inélastique maximal de chaque bloc, doit être calculé au niveau du sommet de chaque bloc (fig. 1.9), selon l'expression suivante :

$$\Delta_M = 0.7R\Delta_s \quad (1.6)$$

Avec:

R : Coefficient de comportement de la structure.

Δ_s : Déplacement maximum dû aux forces sismiques de calcul.

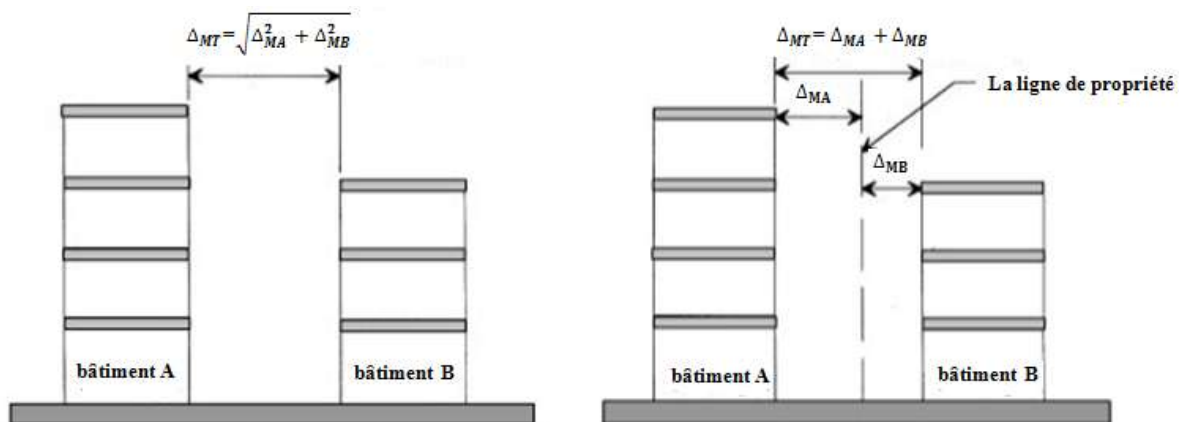


Fig. 1.8 (a) Joints sismiques des bâtiments voisins situés sur la même ligne de propriété, (b) Joint sismique des bâtiments voisins non situés pas sur la même ligne de propriété [12].

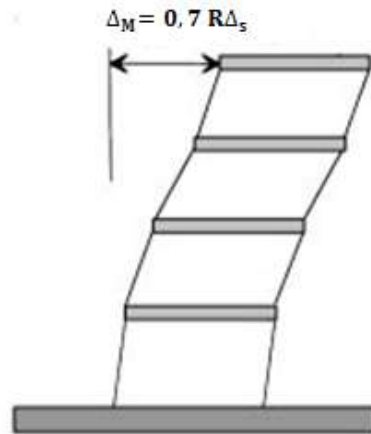


Fig.1.9 Déplacement inélastique maximum du bâtiment [12].

I.6.1.4 Code international du bâtiment (IBC 2000)

Toutes les structures adjacentes seront séparées par une épaisseur suffisante entre eux, les déplacements doivent permettre le déplacement inélastique δ_M [13].

Pour les bâtiments adjacents appartenant à la même propriété seront séparés par au moins δ_{MT} , calculée par l'expression (1.7), selon (clause 1620.3.6) :

$$\delta_{MT} = \sqrt{\delta_{M1}^2 + \delta_{M2}^2} \quad (1.7)$$

Pour les bâtiments adjacents n'appartenant pas à la même propriété, la distance de séparation sera calculée par la formule suivante :

$$\delta_{MT} = \delta_{M1} + \delta_{M2} \quad (1.8)$$

Où δ_{M1} et δ_{M2} Ce sont les déplacements inélastiques des bâtiments adjacents.

• Calcul du déplacement selon la (Clause 1622.3.3)

Le déplacement non-linéaire maximal de chaque bâtiment, doit être déterminé au niveau du sommet de chaque structure avec la considération de la torsion, calculé selon l'expression suivante :

$$\delta_M = \frac{C_d \Delta_s}{I} \quad (1.9)$$

Avec:

C_d : Facteur d'amplification de la flexion.

Δ_s : Déplacement maximum du dernier étage qui se produit lorsque la structure est soumise aux forces sismiques de conception.

I : Facteur d'importance.

I.6.1.5 Agence Fédérale de gestion des catastrophes (FEMA 273-1997)

Pour les bâtiments adjacents destinés à répondre un niveau de sécurité de vie (LS), ils doivent être séparés par une largeur sismique pour empêcher l'effet d'entrechoquement pendant un tremblement de terre. La distance de séparation doit être supérieure ou égale à S_i [14], comme donnée par l'expression (1.10), selon la (clause 2.11.10).

$$S_i = \sqrt{\Delta_{i1}^2 + \Delta_{i2}^2} \quad (1.10)$$

Avec :

Δ_{i1} = Déplacement latéral relatif du bâtiment 1 au niveau i .

Δ_{i2} = Déplacement latéral relatif du bâtiment 2 au niveau i .

La valeur de S_i calculée par l'équation (1.10), ne doit pas dépasser 0.04 fois la hauteur du bloc le moins élevé ($0.04h_2$).

I.6.2 Méthodes de calcul des épaisseurs des joints sismiques

Depuis quelques années, plusieurs auteurs ont étudiés différentes méthodes pour déterminer une séparation sismique adéquate. On cite principalement la méthode de la différence spectrale.

I.6.2.1 Méthode de la différence spectrale

Jeng, Kasai et Maison [1992] ont proposé la méthode de la différence spectrale (SPD) ou bien la règle de la double différence (DDC). Cette méthode basée sur la théorie de la vibration aléatoire considère l'approximation du premier mode de vibration pour déterminer les déplacements des bâtiments à plusieurs étages. Il a été constaté que le déplacement relatif

maximum ne dépend pas seulement des déplacements maximaux des structures, mais aussi sur la prise en compte de la phase liée à la vibration des structures adjacentes [15].

$$S = \sqrt{X_A^2 + X_B^2 - 2\rho_{AB}X_AX_B} \quad (1.11)$$

Avec $X_A, X_B =$ les valeurs des pics des déplacements $X_A(t), X_B(t)$, respectivement.
 ρ_{AB} : est le coefficient de corrélation qui détermine l'importance du mouvement en phase entre différents modes de vibration qui dépend du rapport de période (T_A / T_B), ainsi que ξ_A et ξ_B [16].

La valeur d'est ρ_{AB} donnée par l'expression suivante :

$$\rho_{AB} = \frac{8\sqrt{\xi_A\xi_B} \left(\xi_A + \xi_B \frac{T_A}{T_B} \right) \left(\frac{T_A}{T_B} \right)^{1.5}}{\left[1 - \left(\frac{T_A}{T_B} \right)^2 \right] + 4\xi_A\xi_B \left[1 + \left(\frac{T_A}{T_B} \right)^2 \right] \left(\frac{T_A}{T_B} \right) + 4(\xi_A^2 + \xi_B^2) \left(\frac{T_A}{T_B} \right)^2} \quad (1.12)$$

Où T_A, ξ_A et T_B, ξ_B sont les périodes propres et les coefficients d'amortissement des systèmes "A" et "B", respectivement.

Malgré les différentes hypothèses de simplifications sous lesquelles repose, la règle DDC, elle demeure beaucoup plus précise que les règles ABS et SRSS [17].

I.7 Mécanisme du transfert de l'énergie au cours de l'entrechoquement

Lorsque l'entrechoquement entre deux structures se produit, on observe une force d'interaction transmise d'une structure à la structure adjacente. La présence de la force modifie le niveau d'énergie de chaque structure, et on observe une nouvelle réponse. Une certaine énergie est transférée pendant l'impact, tandis que l'autre partie de l'énergie est dissipée pendant l'impact. Le transfert de l'énergie est plus facile à exprimer dans le cas des structures modélisées comme des systèmes à un seul degré de liberté [18].

Considérons les équations du mouvement des deux structures soumises de la collision :

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + f_c = -m_1 \ddot{x}_g \quad (1.13)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 - f_c = -m_2 \ddot{x}_g \quad (1.14)$$

Avec :

u_i, \dot{u}_i et \ddot{u}_i : Déplacement, vitesse et l'accélération de la structure "i" .

m_i, c_i et k_i : Masse, l'amortissement et la rigidité linéaire de la structure "i" ;

\ddot{x}_g : Accélération du sol ;

f_c : Force de l'entrechoquement (force de contact) entre les structures.

Les équations qui décrivent le bilan énergétique peuvent être obtenues à partir de l'équation (1.13) en multipliant les deux côtés des équations par les vitesses correspondantes, et en intégrant sur la durée de l'excitation ; ce qui donne :

$$E_{k1} + E_{\xi1} + E_{p1} + E_{Tr12} = E_{I1} \quad (1.15)$$

$$E_{k2} + E_{\xi2} + E_{p2} + E_{Tr21} = E_{I2} \quad (1.16)$$

Avec :

$$E_{ki} = \frac{m_i}{2} (\dot{u}_i)^2 : \text{Energie cinétique pour la structure "i"} \quad (1.17)$$

$$E_{\xi i} = \int_0^t c_i (\dot{u}_i(\tau))^2 d\tau : \text{Energie de dissipation pour la structure "i"} \quad (1.18)$$

$$E_{pi} = \int_0^t k_i u_i \dot{u}_i d\tau : \text{Energie de déformation élastique ou plastique} \quad (1.19)$$

$$E_{Tr12} = \int_0^t f_c(\tau) \dot{u}_1(\tau) d\tau : \text{Energie de transfert de la quantité de mouvement} \quad (1.20)$$

$$E_{i1} = - \int_0^t m_1 \ddot{x}_g(\tau) \dot{u}_1(\tau) d\tau : \text{Apport d'énergie imposée à la structure par l'événement sismique} \quad (1.21)$$

Dans cette formulation, le terme de l'énergie de transfert peut être négatif, car il dépend du sens. Autrement dit, un transfert d'énergie positif indique que la partie de l'énergie d'entrée est transférée à l'autre structure, alors qu'un transfert d'énergie négatif indique que l'énergie est reçue à partir de l'autre structure [18].

I.7.1 Modèles analytiques pour l'évaluation de l'entrechoquement

L'entrechoquement entre les structures adjacentes est un phénomène très complexe, ce qui peut conduire à des déformations plastiques aux points de contact. Ces déformations plastiques sont difficiles à incorporer dans la modélisation numérique. En raison de cette complexité, la modélisation de l'impact est une tâche extrêmement difficile. Par conséquent, des hypothèses ont été employées dans les modèles théoriques. Par exemple, la structure est modélisée par éléments finis, avec des oscillateurs d'un seul degré de liberté (SDOF) ou des oscillateurs à plusieurs degrés de liberté (MDOF), et l'entrechoquement est modélisé par un système linéaire ou non-linéaire constitué d'un ressort ou de ressort-amortissement [19].

La collision entre les bâtiments adjacents est simulée soit en appliquant les lois de l'impact de la mécanique des particules (modèle stéréo-mécanique), avec un coefficient de restitution (e), ou au moyen des éléments de contact utilisés dans le domaine du choc qui sera placé entre les deux structures. L'approche de l'élément de contact peut fournir une meilleure approximation du problème réel, à condition que des valeurs appropriées de l'élément de contact soient utilisées. Par conséquent, ces propriétés sont très incertaines et donc très difficiles à déterminer avec précision. Il s'avère que la réponse est tout à fait insensible aux variations dans leurs valeurs [20].

I.7.1.1 Méthode de l'élément de contact

L'approche de l'élément de contact est une formulation très employée en raison de sa facilité d'adaptation et de la nature logique pour modéliser le choc. Le phénomène d'impact est modélisé à l'aide d'un ressort linéaire qui est activé quand l'intervalle entre les structures sera fermé. Cette idéalisation est compatible avec le modèle des bâtiments et adéquate pour étudier l'effet de l'entrechoquement sur la réponse globale de la structure [21].

• Élément de ressort linéaire

L'élément de contact le plus simple se compose d'un élément élastique linéaire (Fig. 1.10). Le ressort est supposé avoir une force de restauration, de telle sorte quand la distance relative entre les masses devient supérieure à la distance initiale (d), le ressort sera activé et produit des forces de contact, ce qui nous permet de d'évaluer l'ampleur de la force d'entrechoquement dans le cadre d'une analyse ordinaire de la réponse. Il travaille uniquement en compression. Ce ressort est supposé être la rigidité axiale des éléments adjacents [22].

La force de contact dans le ressort peut être exprimée selon :

$$f_c = K(u_1 - u_2 + d), \text{ si } (u_1 - u_2 + d) < 0 \quad (1.22)$$

$$f_c = 0, \quad \text{si non} \quad (1.23)$$

Avec :

u_1 et u_2 : Déplacements relatifs des corps.

K : Rigidité de l'élément de contact.

d : Séparation statique entre les structures adjacentes.

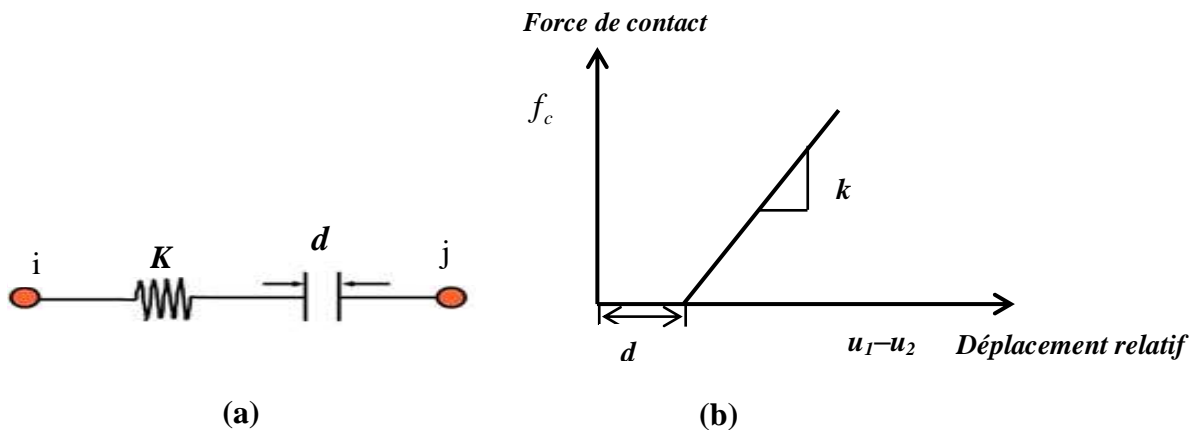


Fig.1.10 (a) Elément de contact, (b) Comportement de l'entrechoquement de l'élément de contact.

Ce modèle d'impact a été largement utilisé dans les travaux de recherche, à cause de la disponibilité de mise en œuvre dans les logiciels commerciaux.

I.7.1.2 Modèle Stéréo-mécanique

La théorie stéréo-mécanique est la formulation classique du problème du choc entre les corps. Cette approche utilise le principe de la conservation de la quantité de mouvement et le coefficient de restitution pour modéliser l'impact. Le coefficient de restitution (e) traduit le rapport des vitesses relatives, respectivement après et avant le choc (Fig.1.11). Cependant, ce modèle stéréo-mécanique n'est pas un modèle de force. Par conséquent, il n'y a aucune force d'impact et aucune amplification dans la réponse d'accélération [23]. Les vitesses des corps sont ajustées après l'impact comme indiqué dans l'expression suivante:

$$\dot{v}_1 = v_1 - (1+e) \frac{m_2(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (1.24)$$

$$\dot{v}_2 = v_2 + (1+e) \frac{m_1(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (1.25)$$

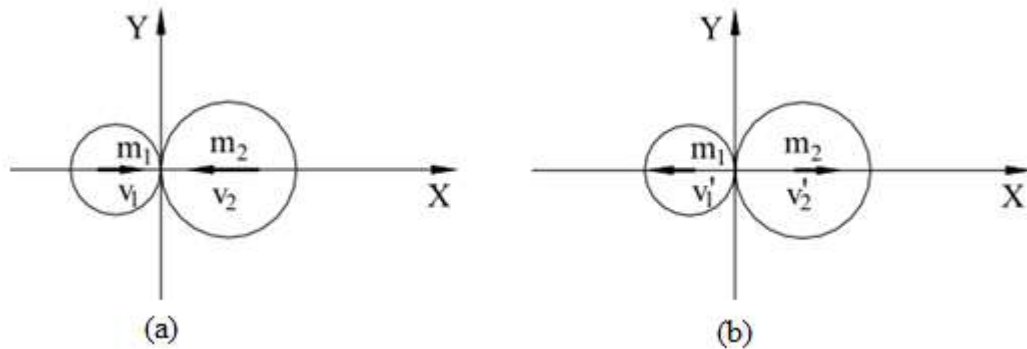


Fig.1.11 Modèle stéréo-mécanique, (a) Avant d'impact, (b) Après d'impact.

Avec :

\dot{v}_1, \dot{v}_2 : Vitesses de collision des masses m_1, m_2 après l'impact.

v_1, v_2 : Vitesses avant l'impact.

e : Coefficient de restitution qui peut être obtenu à partir de l'équation :

$$e = \frac{\dot{v}_2 - \dot{v}_1}{v_1 - v_2} \quad (1.26)$$

Cette approche est basée sur la valeur du coefficient de restitution qui dépend principalement des propriétés des matériaux, la forme des masses et les vitesses relatives. Cependant, cette approche est difficile à modéliser à cause de la non-disponibilité dans les logiciels commerciaux, et la difficulté de détermination du coefficient de restitution.

I.8 Conclusion

Comme il a été illustré dans ce chapitre, des séismes récents ont indiqué que l'entrechoquement entre les structures peut causer des dommages structurels et non-structurels. Basé sur une revue de la littérature, les paramètres affectant l'entrechoquement comprennent les configurations des structures, l'écart entre les structures adjacentes et les caractéristiques des mouvements du sol. Les dommages sont dans la plupart des cas difficiles à analyser et à évaluer, car leurs origines peuvent être diverses. La seule méthode proposée dans les règlements parasismiques pour atténuer l'effet d'entrechoquement est de fournir une séparation adéquate entre des structures adjacentes.

L'entrechoquement a été modélisé en utilisant des éléments de contact utilisés dans le domaine du choc, comme un ressort linéaire ou non-linéaire, ou une approche de la mécanique classique utilise le principe de la conservation de la quantité de mouvement et le coefficient de restitution.

La seule conclusion commune est que l'effet de l'entrechoquement sur la réponse des structures est très complexe, en raison de divers paramètres décrivant les caractéristiques des structures et les caractéristiques du mouvement du sol.

CHAPITRE II

EFFET DE L'ENTRECHOQUEMENT ENTRE LES STRUCTURES ISOLEES A LA BASE

Chapitre II EFFET DE L'ENTRECHOQUEMENT ENTRE LES STRUCTURES ISOLEES A LA BASE

II.1 Introduction

L'isolation sismique est une alternative de conception admise pour la réduction des risques des tremblements de terre et la réalisation d'une performance sismique supérieure pour les structures par l'introduction d'un ensemble d'appuis parasismiques entre la superstructure et ses fondations. L'isolation sismique à la base consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure résultant en une réduction des accélérations transmises à la superstructure et de l'allongement de la période fondamentale de la structure. Par ailleurs, l'augmentation de la période fondamentale de la structure est accompagnée par l'augmentation de la demande en déplacement de cette dernière.

L'augmentation de la demande en déplacement engendrera la possibilité de l'entrechoquement d'un bâtiment isolé à la base contre les ouvrages liés au sol ou contre les bâtiments adjacents suite un séisme majeur. Dans ce cas, les joints de séparation éventuels entre deux bâtiments ou des parties de bâtiment sur les isolateurs nécessitent des largeurs importantes en raison des déplacements de chaque bâtiment, pouvant atteindre des valeurs décimétriques.

Le présent Chapitre vise donc à présenter une vue d'ensemble sur les techniques d'isolation sismique. Ensuite, on va présenter les différents règlements de calcul de l'épaisseur du joint sismique des structures isolées ainsi que la formulation de l'équation du mouvement du système d'un seul degré de liberté sur un isolateur incluant l'effet de l'entrechoquement.

II.2 Définition de l'isolation à la base

L'isolation sismique à la base est une stratégie efficace pour réduire les accélérations et les déplacements inter-étages dans les structures au cours d'un séisme. Contrairement aux stratégies traditionnelles de conception qui visent à augmenter la capacité de la structure pour qu'il résiste mieux face aux actions sismiques. Les systèmes d'isolation à la base présentent un niveau flexible entre la structure et la base afin d'isoler le mouvement du sol du mouvement de la structure, en d'autres termes en allongeant sa période fondamentale de vibration. Cependant, l'augmentation de la période fondamentale de la structure est toujours accompagnée d'un accroissement de la demande en déplacement (fig.2.1) au niveau de la base de la structure. Par ailleurs, l'augmentation de l'amortissement à la base par l'utilisation des dispositifs d'amortissements en conjonction avec le système d'isolation est une option pour réduire ce grand déplacement [23].

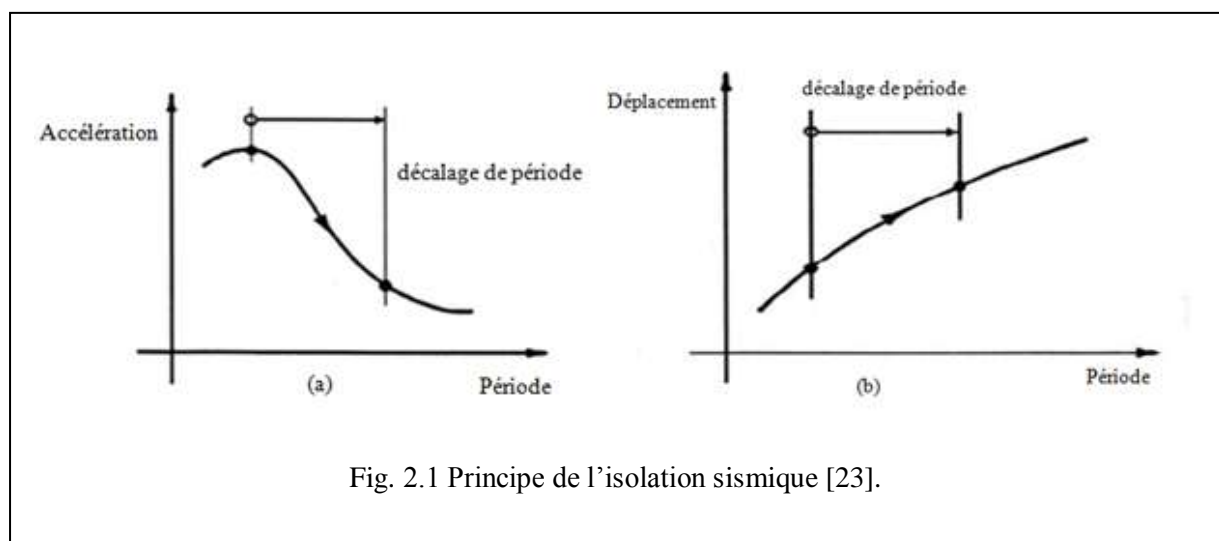


Fig. 2.1 Principe de l'isolation sismique [23].

II.3 Objectif de l'isolation sismique

L'isolation sismique à la base consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière. Les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure non isolée. L'isolateur capte les déformations inélastiques et filtre les accélérations de hautes fréquences de sorte que la superstructure isolée (au-dessus) se déplace essentiellement comme un corps rigide et subit de

faibles accélérations et presque pas de déformations. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limitées et restent en dessous de la capacité élastique de ces éléments [24].

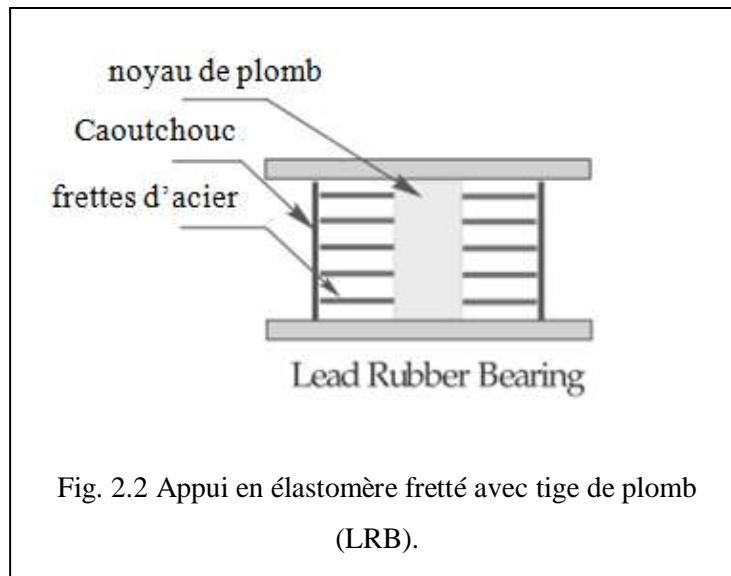
II.4 Différents types d'appuis parasismiques

Il existe plusieurs types d'isolations sismiques et selon leur mode de fonctionnement, ils peuvent être répertoriés comme suit :

II.4.1 Appuis à déformation

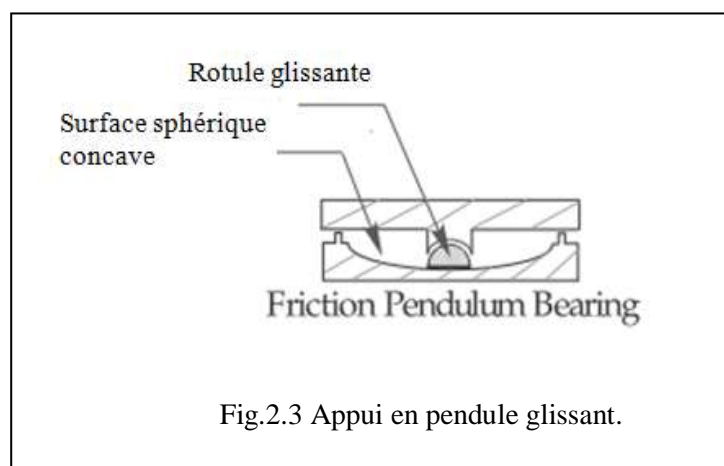
Les appuis parasismiques à déformation utilisés pour isoler les constructions sont analogues aux appuis couramment utilisés pour les ponts et ils ont toujours montré un comportement satisfaisant. Ils sont en général constitués d'un assemblage de feuillets d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (néoprène) séparés par des plaques métalliques [25].

La présence des plaques métalliques confère aux appuis une grande rigidité verticale alors que les feuillets d'élastomère peuvent se déformer facilement en cisaillement, permettant d'obtenir une grande souplesse vis-à-vis des efforts horizontaux agissant sur le bâtiment et autorisent de grands déplacements en superstructure. On distingue différents types d'appuis à déformation tels que les appuis en caoutchouc fretté, les appuis en élastomère avec noyau de plomb (fig.2.2), et les appuis en élastomère fretté à amortissement élevé.



II.4.2 Appuis à glissement

Ce système est composé de plaques solidaires à la superstructure et d'autres fixées aux fondations et leur interface constitue le plan de glissement. Ces systèmes permettent le découplage des mouvements de la superstructure des éléments de fondation au moyen d'interface de glissement. De plus, l'interface de glissement permet de dissiper l'énergie sismique par friction. Parmi ces appuis, on peut citer les appuis en pendule glissants qui utilisent une interface de glissement sous forme de cuvette (portion d'une sphère) qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule (fig.2.3).

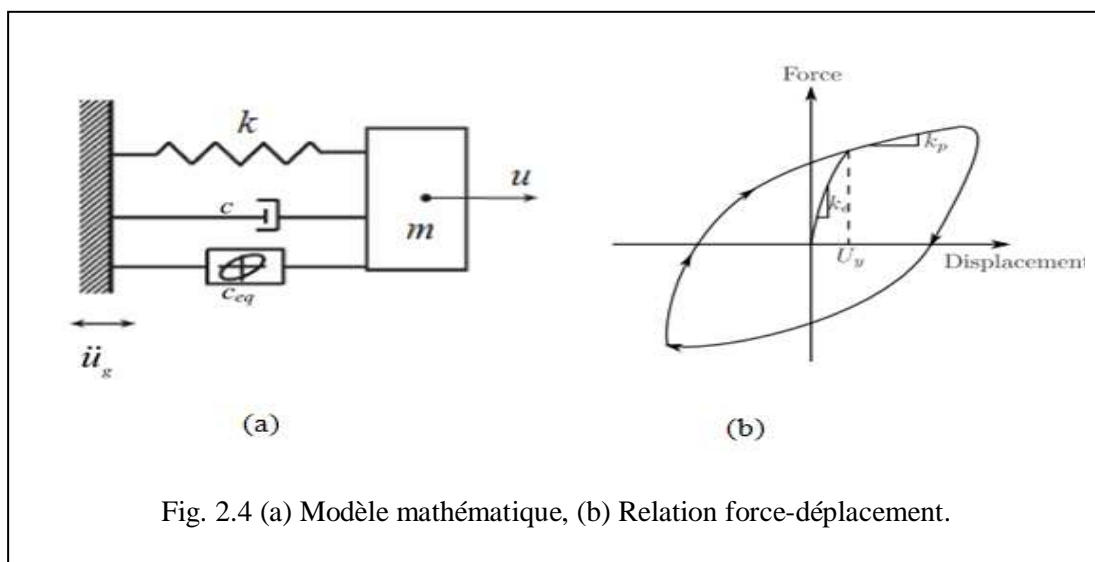


II.5 Fonctionnement et modélisation mathématique des appuis parasismiques

La schématisation des systèmes d'isolation par des modèles mathématiques est une étape essentielle dans l'étude dynamique des structures isolées, elle permet l'établissement des relations théoriques de leur comportement. Par conséquent, une bonne schématisation des systèmes d'appuis parasismiques par des modèles mathématiques qui permettent la formulation des équations du mouvement est très intéressante pour l'analyse du comportement des systèmes combinés (le système d'isolation et la superstructure).

II.5.1 Système en caoutchouc (élastomère fretté) avec amortisseur en tige de plomb (lead rubber bearing system ; LRB)

Le principe de fonctionnement de ce système est décrit dans la fig (2.4).



Le système d'appui est traduit par le modèle mathématique représenté dans la fig.2.4 :

Le système soumis à l'accélération du sol \ddot{u}_g , l'équation du mouvement est donnée comme suit :

$$m\ddot{u} + c_{eq}\dot{u} + k_{eff}u = -m\ddot{u}_g \quad (2.1)$$

Avec :

m : Masse de la superstructure.

K_{eff} : Rigidité effective du système d'isolation.

c_{eq} : Coefficient d'amortissement équivalent linéaire donnée par :

$$c_{eq} = 2\xi_{eq}\sqrt{mk_{eff}} \quad (2.2)$$

ξ_{eq} = Rapport d'amortissement linéaire équivalent donnée par :

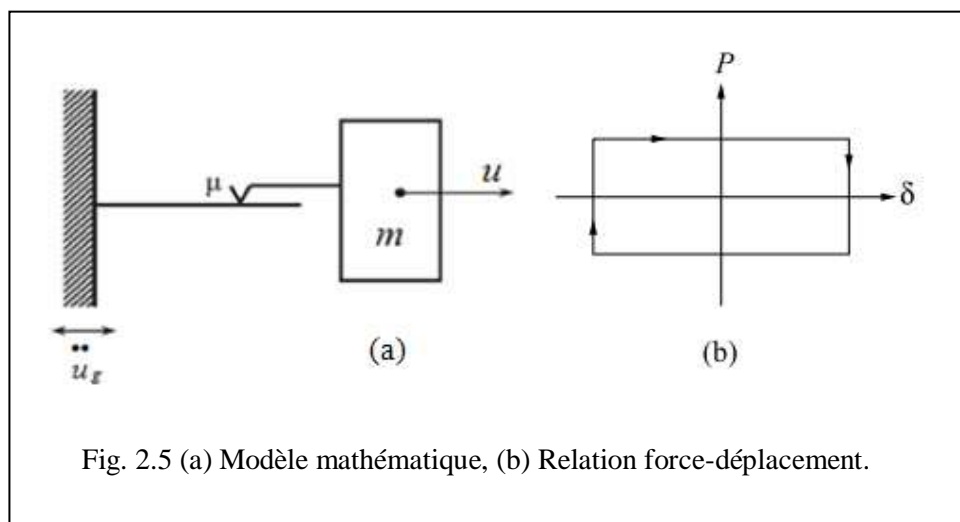
$$\xi_{eq} = \frac{\Delta E}{2\Pi K_{eff} D_D^2} \quad (2.3)$$

ΔE = Energie totale dissipée.

D_D = Déplacement de conception.

II.5.2 Système à frottement pur (Pure friction system ; PF)

Le principe de fonctionnement de ce système est décrit dans la fig. (2.5).



Le système soumis à l'accélération du sol \ddot{u}_g , l'équation du mouvement est donnée comme suit :

$$m\ddot{u} + \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{u}) = -m\ddot{u}_g \quad (2.4)$$

Avec :

μ : Coefficient de frottement.

g : Accélération de la pesanteur.

$\operatorname{sgn}(\dot{u})$: Signe de la direction de la vitesse du dispositif.

La condition de glissement est donnée par la formule :

$$\left| \ddot{u}_g - \mu g \right| < 0 \quad (2.5)$$

II.6 Endroits les plus vulnérables à l'entrechoquement

Les bâtiments isolés à la base devront subir de grands déplacements pendant un séisme majeur. Afin d'accommoder ces grands déplacements, une largeur suffisante doit être fournie autour du bâtiment. La considération d'une largeur sismique autour d'un bâtiment isolé à la base en combinaison avec une excitation sismique, engendre la possibilité de l'entrechoquement soit avec les bâtiments adjacents ou avec les ouvrages du sol qui l'entoure [26]. Par conséquent, l'entrechoquement peut se produire principalement au niveau de la base du bâtiment entre les planchers ou à mi-hauteur des poteaux.

II.6.1 Entrechoquement avec les ouvrages liés au sol (fig. 2.6-a)

Ce type d'entrechoquement se produit dans le cas d'une largeur sismique insuffisante entre la structure isolée et les ouvrages liés au sol, une préoccupation raisonnable est la possibilité de l'entrechoquement à la base du bâtiment contre les ouvrages qui l'entoure au cours d'un séisme majeur. Lorsque le déplacement à la base dépasse la largeur sismique considérée, dans ce cas, le plancher au-dessus du système d'isolation sismique rentre en choc avec l'ouvrage lié au sol [26].

II.6.2 Entrechoquement avec les bâtiments adjacents (fig. 2.6-b)

La considération d'une largeur sismique entre les bâtiments isolés à la base en combinaison avec un séisme majeur, peut produire la possibilité de l'entrechoquement au niveau des planchers de leur superstructure. Dans ce cas, la largeur du joint doit être grande pour permettre des mouvements sans risque de choc.

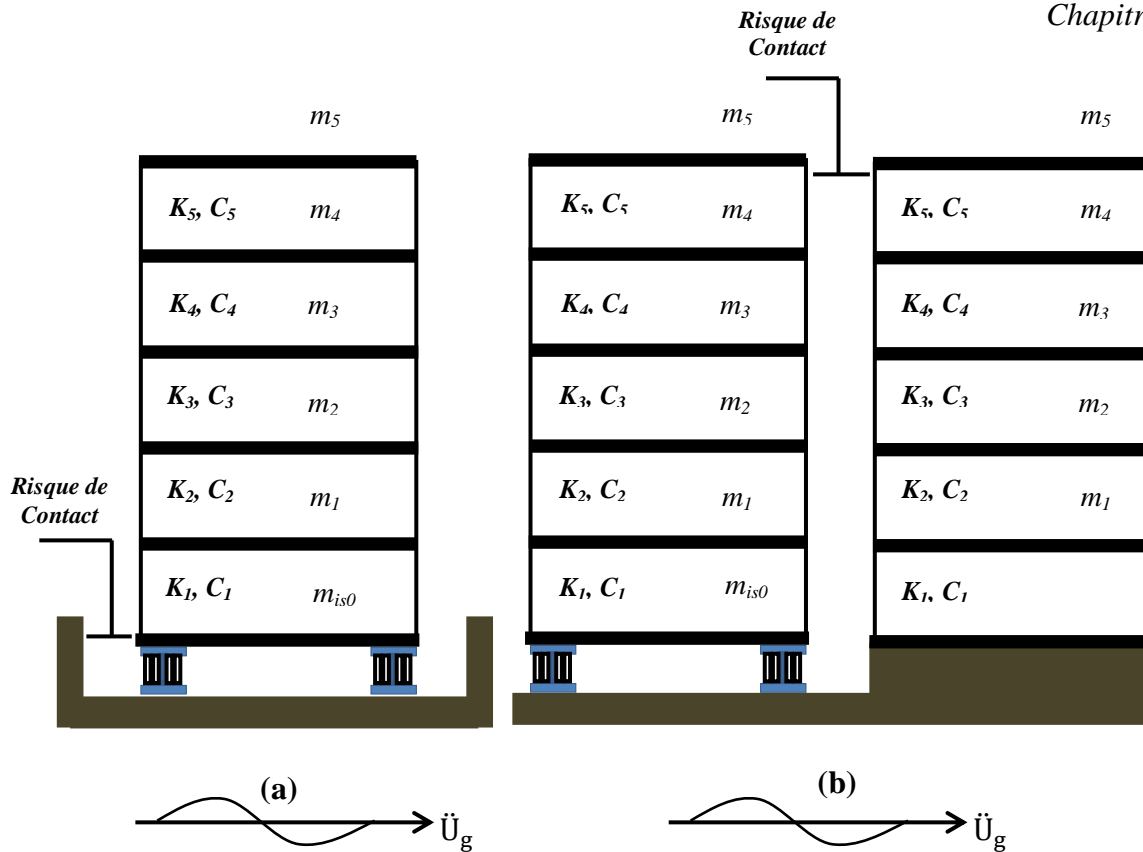


Fig. 2.6 (a) Structure isolée au voisinage d'un mur de soutènement (impact au niveau de la base), (b) Structure isolée au voisinage d'une structure conventionnelle (impact au niveau des planchers).

II.7 Evaluation de la distance de séparation selon les codes parasismiques

Les codes parasismiques attirent l'attention sur le phénomène de l'entrechoquement entre les structures isolées à la base. L'approche généralement adoptée est la même que celle des structures conventionnelles et consiste à fournir une largeur suffisante. La largeur du joint sismique dans le cas d'un joint entre la superstructure et des ouvrages liés au sol, doit être la valeur absolue maximale du déplacement d'un point quelconque de la superstructure située au bord du joint. Dans le cas de deux blocs adjacents sur appuis parasismiques, la valeur maximale du joint doit être de la somme des valeurs absolues des déplacements de deux points quelconques prise de part et d'autre part du joint.

Les codes ne traitent pas la distance de séparation entre une structure conventionnelle et l'autre isolée et entre deux structures isolées à la base.

II.7.1 Code du bâtiment international (IBC 2000)

La séparation minimale entre les structures isolées à la base et les murs de soutènement d'entourage ou d'autres obstructions fixes ne doit pas inférieure au déplacement horizontal maximal, selon la (clause 1623.5.2.2) [13].

- **Calcul du déplacement selon la (Clause 1623.2.7)**

Le déplacement inter-étage maximum de la structure au-dessus du système d'isolation ne doit pas dépasser $0.015h_{xx}$. Avec h : est la hauteur de l'étage au-dessous du niveau x.

Le déplacement doit être calculé par l'équation (1.9), selon la (clause 1617.4.6.1). Avec le facteur C_I de la structure isolée égale au facteur R_I .

R_I : Facteur de réduction de la force de conception relié au type du système de contreventement des structures au-dessus du système d'isolation.

II.7.2 Code du bâtiment uniforme (UBC 1997)

La séparation minimale entre les structures isolées à la base et les murs de soutènement d'entourage ou d'autres obstructions fixes ne doit pas inférieure au déplacement horizontal maximal, selon la (clause 1623.5.2.2) [12].

- **Calcul du déplacement selon la (Clause 1658.6)**

Le déplacement inter-étage maximal correspondant aux forces sismiques de conception, y compris le déplacement dû à la déformation verticale du système d'isolation, ne doit pas dépasser $0.010/R_I$,

R_I : facteur de réduction de la force de conception relié au type du système de contreventement des structures au-dessus du système d'isolation.

II.8 Formulation mathématique de l'effet de l'entrechoquement

Pour bien comprendre le comportement dynamique des structures adjacentes avec l'effet de l'entrechoquement, il est nécessaire de faire un modèle mathématique qui permet la formulation de l'équation du mouvement du système à un seul degré de liberté (SDOF)

encastré et isolé à la base, et excité par un séisme d'accélération \ddot{u}_g , incluant la force d'impact au niveau de la masse de chaque bâtiment.

II.8.1 Bâtiments encastrés à la base à un seul degré de liberté

Dans cette formulation, on considère deux bâtiments adjacents soumis à une excitation sismique. Comme le montre la (fig.2.7), les bâtiments adjacents sont modélisés comme un oscillateur à un seul degré de liberté (SDOF) avec des masses concentrées m_1, m_2 . Les bâtiments montrés sont séparés par une distance (d) entre le premier et le deuxième bâtiment. La rigidité des deux bâtiments (k_1), (k_2) et les constants d'amortissements visqueux linéaires (C_1), (C_2) respectivement. L'impact entre les bâtiments est modélisé, en introduisant un ressort linéaire qui s'activera seulement en cas de collision.

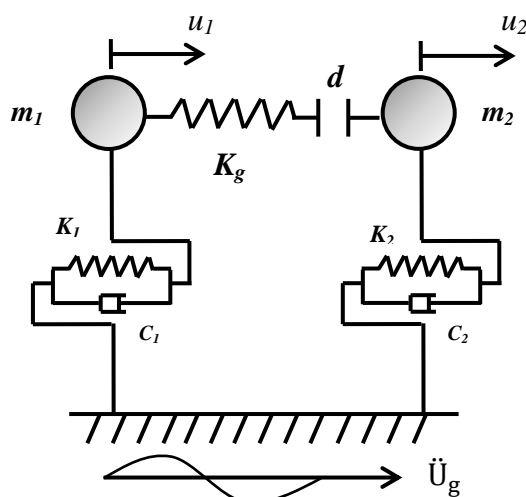


Fig. 2.7 Schéma de deux bâtiments adjacents à un seul degré de liberté.

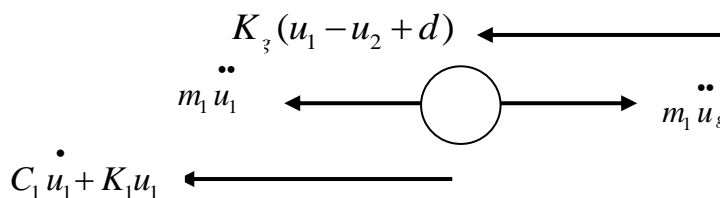


Fig. 2.8 Digramme des forces agissant sur la masse (m_1).

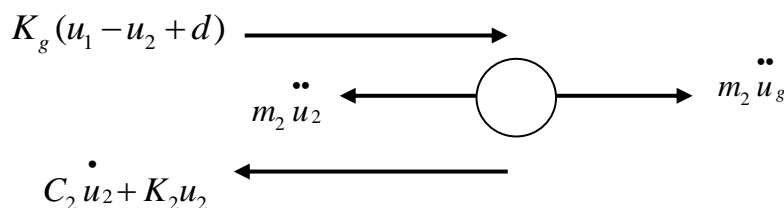


Fig. 2.9 Diagramme des forces agissant sur la masse (m_2).

L'équation dynamique du mouvement inclue l'effet de l'entrechoquement entre deux oscillateurs à un seul degré de liberté, peut être écrite en appliquant le principe d'Alembert (fig. 2.8). L'équation de l'équilibre dynamique de la masse (1) qui rentre en impact avec la deuxième masse est :

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + k_g (u_1 - u_2 + d) = -m_1 \ddot{u}_g \quad (2.6)$$

De la même façon, pour la masse (2) (fig. 2.9), on obtient :

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 - k_g (u_1 - u_2 + d) = -m_2 \ddot{u}_g \quad (2.7)$$

Tels que:

u_1, u_2 : Déplacements relatifs des bâtiments (1) et (2) respectivement.

\dot{u}_1, \dot{u}_2 : vitesses relatives des bâtiments (1) et (2) respectivement.

\ddot{u}_1, \ddot{u}_2 : Accélérations relatives des bâtiments (1) et (2) respectivement.

\ddot{u}_g : Accélération du sol.

A Noter que ces équations sont couplées par les termes d'impact. Une matrice plus commode peut être développée. En combinant ces équations et en rassemblant les rigidités et la contribution d'amortissements des deux bâtiments et le terme de l'impact entre les bâtiments, l'équation du mouvement pour le système des deux bâtiments peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g(u_1 - u_2 + d) \\ -k_g(u_1 - u_2 + d) \end{bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

En Rassemblant les rigidités et la contribution des amortissements, on obtient l'expression suivante :

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g & -k_g \\ -k_g & k_g \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g(d) \\ -k_g(d) \end{bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Au début de la simulation lorsque les masses sont stationnaires, le ressort d'impact n'agit pas et les valeurs attribuées à k_g devront être zéro dans l'équation ci-dessus. Plus formellement, ces contraintes peuvent être exprimées comme suit :

$$u_1 - u_2 + d \geq 0 \rightarrow k_g = 0. \tag{2.10}$$

Le contact entre les masses se produit quand $(u_1 - u_2 + d < 0)$ est satisfaite. Quand ceci se produit le premier bâtiment rentre en choc avec le second. L'ampleur de la force d'impact qui se produit entre les bâtiments peut être aussi calculée par l'expression suivante :

$$F_c = |k_g(u_1 - u_2 + d)| \tag{2.11}$$

Cette force agit vers la gauche du bâtiment (1) et vers la droite du bâtiment (2).

II.8.2 Bâtiments isolés à la base à un seul degré de liberté

Dans la section précédente, une formulation a été décrite séparément pour les bâtiments conventionnels. Le prochain objectif est de formuler l'équation dynamique pour

deux oscillateurs adjacents montés sur un système d'isolation à frottement pur par exemple, présentés dans la fig (2.10).

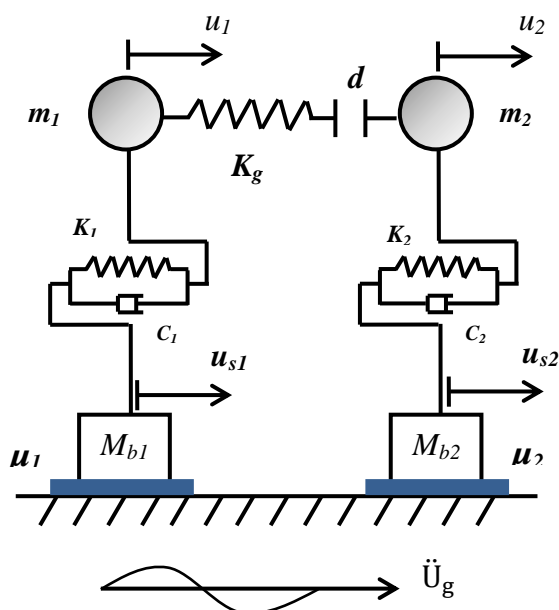


Fig. 2.10 Deux bâtiments montés sur un appui à frottement pur.

L'équation dynamique pour ce système peut être écrite en incluant les termes de la force d'impact dans l'équation dynamique du système à un seul degré de liberté isolé à la base. A noter que les déplacements utilisés pour calculer la force d'impact sont par rapport à la partie inférieure de la fondation, puisqu'il y aura un déplacement supplémentaire dû au glissement [27].

L'équation de l'équilibre dynamique de la masse (1) qui rentre en choc avec la deuxième masse est :

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + k_g (u_1 - u_2 + d) = -m_1 \ddot{u}_g - m_1 \ddot{u}_{s1} \quad (2.12)$$

De la même façon, pour la masse (2), on obtient :

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 - k_g (u_1 - u_2 + d) = -m_2 \ddot{u}_g - m_2 \ddot{u}_{s2} \quad (2.13)$$

L'équation du mouvement pour le système des deux bâtiments peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g(u_1 - u_2 + d) \\ -k_g(u_1 - u_2 + d) \end{bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{s1} \\ \ddot{u}_{s2} \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

En Rassemblant la rigidité et de la contribution des amortissements, on obtient l'expression suivante :

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g & -k_g \\ -k_g & k_g \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g(d) \\ -k_g(d) \end{bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{s1} \\ \ddot{u}_{s2} \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Le contact entre les masses concentrées se produit quand $(u_1 - u_2 + d < 0)$ est satisfaite.

On peut écrire l'équation dynamique du mouvement pour chaque bâtiment monté sur un appui à frottement pur. L'équation dynamique pour le bâtiment (1) est comme suit :

$$(M_{b1} + m_1) \ddot{u}_{s1} + F_{f1} \operatorname{sgn}(\dot{u}_{s1}) + m_1 \dot{u}_1 = -(M_{b1} + m_1) \ddot{u}_g \tag{2.16}$$

Pour le bâtiment (2) :

$$(M_{b2} + m_2) \ddot{u}_{s2} + F_{f2} \operatorname{sgn}(\dot{u}_{s2}) + m_2 \dot{u}_2 = -(M_{b2} + m_2) \ddot{u}_g \tag{2.17}$$

La condition de glissement pour chacun des deux bâtiments est donnée par la formule suivante :

Pour le bâtiment (1) :

$$\left| (m_1 + M_{B1}) \ddot{u}_g + m_1 \ddot{u}_1 \right| < \mu(m_1 + M_{B1})g \tag{2.18}$$

Pour le bâtiment (2) :

$$\left| (m_2 + M_{B2}) \ddot{u}_g + m_2 \ddot{u}_2 \right| < \mu(m_2 + M_{B2})g \tag{2.19}$$

II.9 Conclusion

les observations des séismes passés ont montré que l'effet de l'entrechoquement entre des structures adjacentes peut causer des dommages graves dans certains cas ou même l'effondrement complet, surtout pendant un séisme majeur. Cependant, il n'y a pas beaucoup d'expérience de l'entrechoquement entre les bâtiments isolés à la base, car il s'agit d'une technologie antisismique relativement récente. Par ailleurs, on a constaté que la présence d'un bâtiment isolé à la base à proximité avec d'autres bâtiments ou avec les murs de soutènement extérieurs ou d'autres obstructions fixes peuvent provoquer du phénomène de l'entrechoquement au cours d'un séisme.

CHAPITRE III

EVALUATION DE LA DISTANCE DE SEPARATION ENTRE LES STRUCTURES ENCASTREES A LA BASE

Chapitre III EVALUATION DE LA DISTANCE DE SEPARATION ENTRE LES STRUCTURES ENCASTREES A LA BASE

III.1 Introduction

Comme il a été illustré dans l'étude bibliographique, la manière la plus simple et efficace pour atténuer l'effet de l'entrechoquement est de fournir une séparation adéquate entre les structures adjacentes. Afin d'étudier l'effet de l'entrechoquement entre les structures encastrées à la base. Ce chapitre est divisé en deux parties qui seront consacrées à une application numérique à l'aide du logiciel IDARC v6.1 (développé par Valles et al, 1996). Dans la première partie, une analyse dynamique non-linéaire par accélérogramme sera réalisée pour estimer la distance de séparation entre les structures. Dans la deuxième partie, une simulation de l'ampleur de la force de contact sera étudiée à l'aide d'un modèle de contact linéaire. L'influence de la variation de la distance de séparation et l'accélération maximale du sol (PGA) seront étudiées d'une façon paramétrique.

III.2 Formulation de l'analyse dynamique non-linéaire

Lors d'une analyse dynamique non-linéaire, la non-linéarité peut se manifester au niveau de la rigidité, la variation de la rigidité d'un système provient principalement des changements des propriétés mécaniques du matériau de la structure.

En général pour les structures non-linéaires (inélastiques), la courbe de chargement initial est bilinéaire, et les courbes de déchargement et de rechargement diffèrent de la branche de chargement initial. Ainsi, les relations entre les forces latérales f_s et les déplacements latéraux u de chaque niveau dépendent de l'histoire des déplacements [28] :

$$f_s = f_s(u, \text{sign} \dot{u}) \quad (4.1)$$

A cet effet pour les systèmes inélastiques, l'équation différentielle régissant la réponse d'une structure à plusieurs degrés de liberté (multi-étages) soumise à une excitation sismique, $\ddot{u}_g(t)$ est donnée par :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \text{sign} \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (4.2)$$

En exprimant les déplacements du système inélastique en termes de coordonnées modales généralisées $q_n(t)$ du système linéaire équivalent, on obtient :

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad (4.3)$$

En substituant l'équation (4.3) dans l'équation (4.2), en pré-multipliant par ϕ_n^t et en utilisant les propriétés d'orthogonalité des modes, on trouve :

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \frac{F_{sn}}{M_n} = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4.4)$$

Où ω_n est la fréquence naturelle et ξ_n est le coefficient d'amortissement du $n^{\text{ième}}$ "mode".

La force résistante dépend donc de toutes les coordonnées modales $q_n(t)$ impliquant leur couplage en raison de la plastification de la structure :

$$F_{sn} = F_{sn}(q_n, \dot{\text{sign}} q_n) = \phi_n^T f_s(u_n, \dot{\text{sign}} u_n) \quad (4.5)$$

L'analyse d'un problème dynamique par la méthode d'intégration temporelle se fait généralement par une approche implicite, par exemple la méthode de l'accélération moyenne de Newmark. La fiabilité des résultats est assurée par l'utilisation d'un algorithme inconditionnellement stable et le choix d'un pas de temps qui conditionnent la stabilité et la précision de calcul.

III.3 Description des structures étudiées

Les structures étudiées (8 niveaux, 6 niveaux, 3 niveaux) sont constituées de portiques autostables en béton armé (poteaux-poutres).

La figure (3.1) montre les dimensions en élévation des structures étudiées.

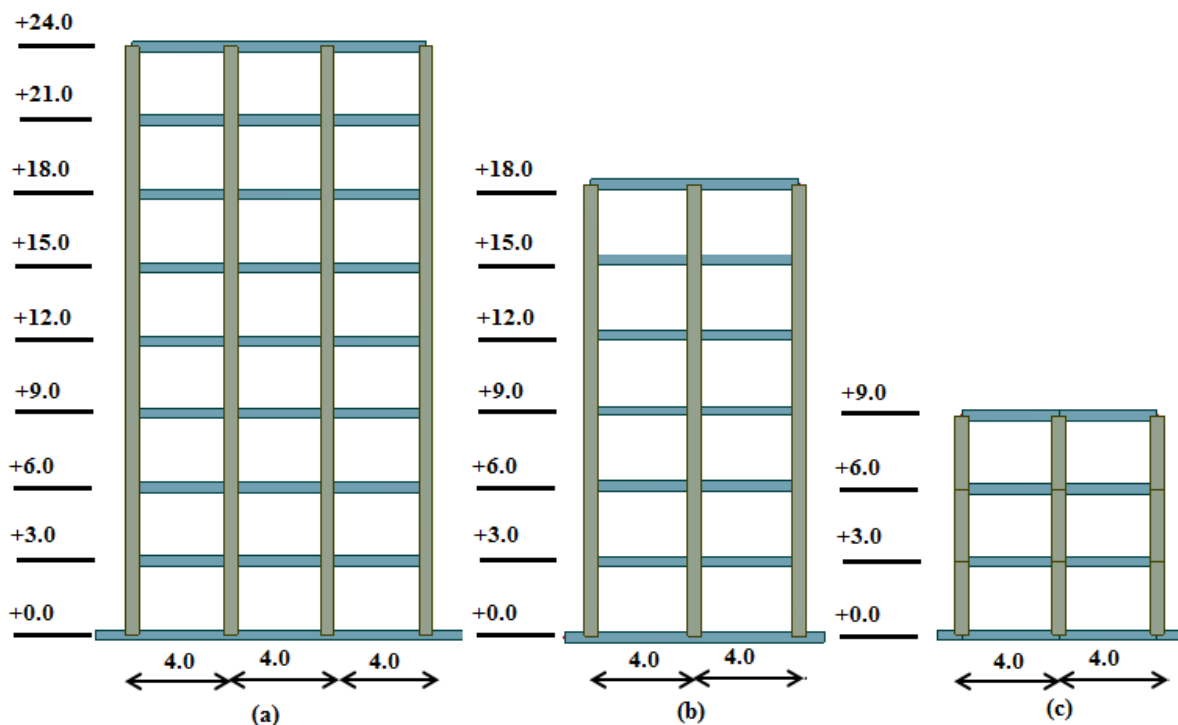


Fig. 3.1 Vue en élévation avec dimensions des structures étudiées. (a) : 8 Niveaux (SP8), (b) : 6 Niveaux (SP6), (c) : 3 Niveaux (SP3).

Tous les éléments structuraux ont une section transversale rectangulaire. Les hauteurs et les largeurs de chaque poutre et colonne sont données sur les tableaux (3.1), (3.2), (3.3).

Tableau 3.1 Dimensions des sections transversales des éléments structuraux du portique (SP8).

Eléments	Niveaux	Largeur (cm)	Hauteur (cm)
Poteaux	1, 2 et 3	60	60
	4, 5 et 6	50	50
	7 et 8	40	40
Poutres	Tous les niveaux	35	40

Tableau 3.2 Dimensions des sections transversales des éléments structuraux du portique (SP6).

Eléments	Niveaux	Largeur (cm)	Hauteur (cm)
Poteaux	1, 2 et 3	60	60
	4, 5 et 6	50	50
Poutres	Tous les niveaux	35	40

Tableau 3.3 Dimensions des sections transversales des éléments structuraux du portique (SP3).

Eléments	Niveaux	Largeur (cm)	Hauteur (cm)
Poteaux	1, 2 et 3	35	35
Poutres	Tous les niveaux	30	35

Les caractéristiques du matériau des structures sont présentées dans le tableau (3.4)

Tableau 3.4 Caractéristiques du matériau de construction.

Masse volumique du béton	2.5 (KN/m ³)
Module de Young du béton	3.21x 10 ⁷ (KN/m ²)
Résistance à la compression	25 x10 ³ (KN/m ²)
Résistance de l'acier	400x10 ³ (KN/m ²)

III.4 Modélisation de la structure

Les structures sont modélisées en utilisant le logiciel IDARC v6.1 dans sa version 2D. Dans cette modélisation, on fera l'hypothèse que la masse peut être concentrée aux niveaux des étages et qu'elle est reliée au poids des poutres (fig.3.2). Le modèle est supposé être encasté à la base négligeant tout effet d'interaction avec le sol.

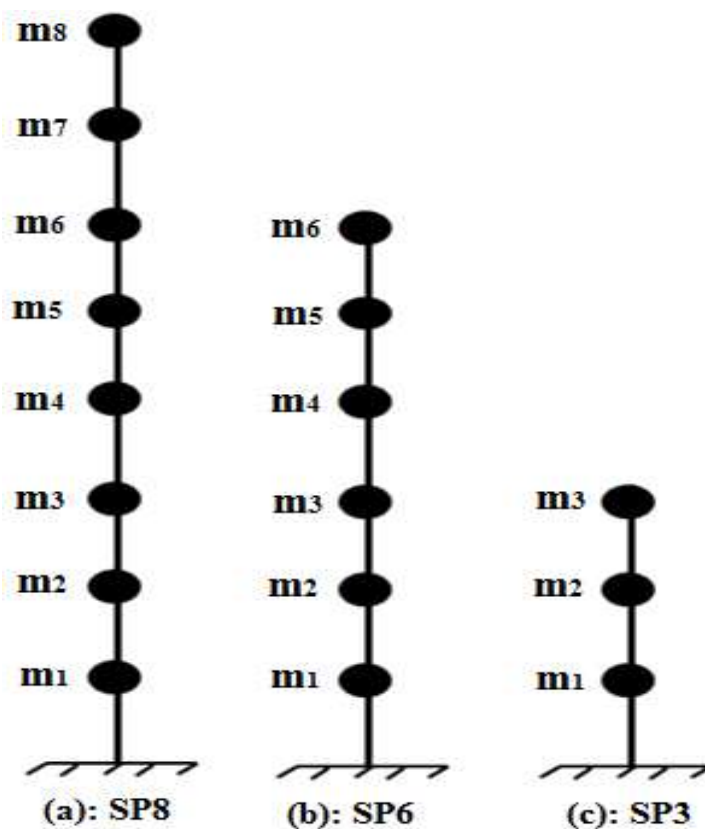


Fig.3.2 Modélisation en masses concentrées des structures étudiées.

III.4.1 Analyse et interprétation des résultats

III.4.1.1 Analyse modale

Les résultats de l'analyse modale des structures sont montrés dans les tableaux (3.5), (3.6) et (3.7).

Tableau 3.5 Résultats de l'analyse modale du portique (SP8).

Mode	f_n (HZ)	T_n (sec)	Γ_n	α_1 (%)
1	1.22	0.81	1.558	77.10
2	3.60	0.27	-0.611	11.87
3	6.40	0.15	-0.386	4.74
4	9.60	0.10	0.258	2.11
5	12.45	0.08	0.205	1.33
6	16.50	0.06	0.211	1.41
7	21.12	0.04	0.152	0.73
8	27.31	0.03	0.144	0.66

Tableau 3.6 Résultats de l'analyse modale du portique (SP6).

Mode	f_n (HZ)	T_n (sec)	Γ_n	α_1 (%)
1	1.59	0.62	1.175	79.31
2	5.14	0.19	0.45	11.63
3	9.73	0.10	-0.275	4.34
4	15.11	0.066	0.212	2.58
5	20.62	0.048	0.146	1.22
6	27.46	0.036	0.126	0.92

Tableau 3.7 Résultats de l'analyse modale du portique (SP3).

Mode	f_n (HZ)	T_n (sec)	Γ_n	α_1 (%)
1	3.13	0.32	0.461	85.63
2	10.54	0.094	0.168	11.38
3	20.07	0.05	0.086	2.30

Les tableaux (3.5), (3.6) et (3.7) présentent les résultats de l'analyse modale pour les 03 portiques étudiés, les résultats montrent que les premiers modes de vibration sont des modes de translation pure et les facteurs de participation massique supérieurs à 70% pour les 03 structures.

III.4.1.2 Analyse dynamique non-linéaire par accélérogramme

Une analyse dynamique non-linéaire est réalisée en imposant directement le mouvement sismique à la base de la structure. Pour cela, on choisit le modèle élasto-plastique pour modéliser le comportement hystérétique des matériaux.

Le chargement est introduit sous forme d'une accélération appliquée à la base. La composante (N-S) de l'accélérogramme enregistré lors du séisme d'El-Centro (1940) a été utilisée (Fig. 3.3). L'accélération max (PGA) est de 0.318g avec une durée de 31.18 secondes.

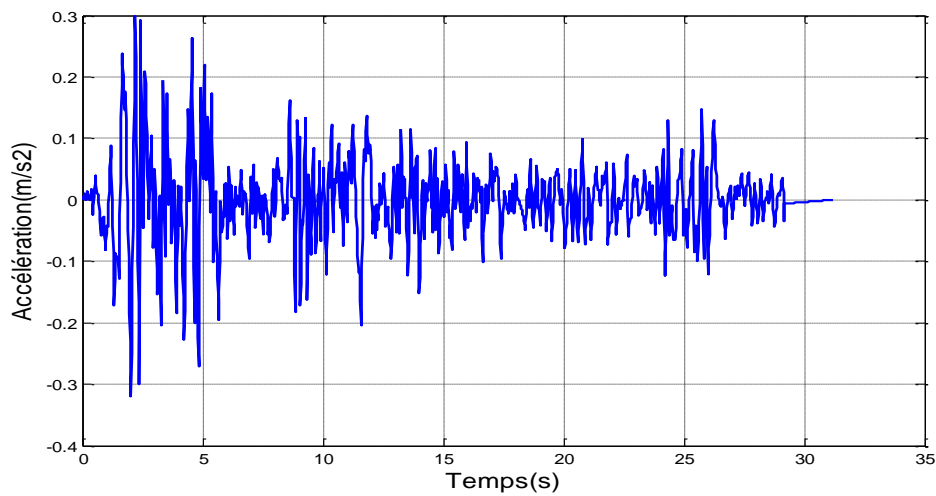


Fig.3.3 Accélérogramme du séisme d'El-Centro 1940 composante (N-S).

L'entrechoquement entre les structures adjacentes se produit lorsque la largeur du joint est insuffisante. Les courbes qui montrent la variation temporelle du déplacement au niveau du point de contact sont représentées sur les figures (3.4), (3.5).

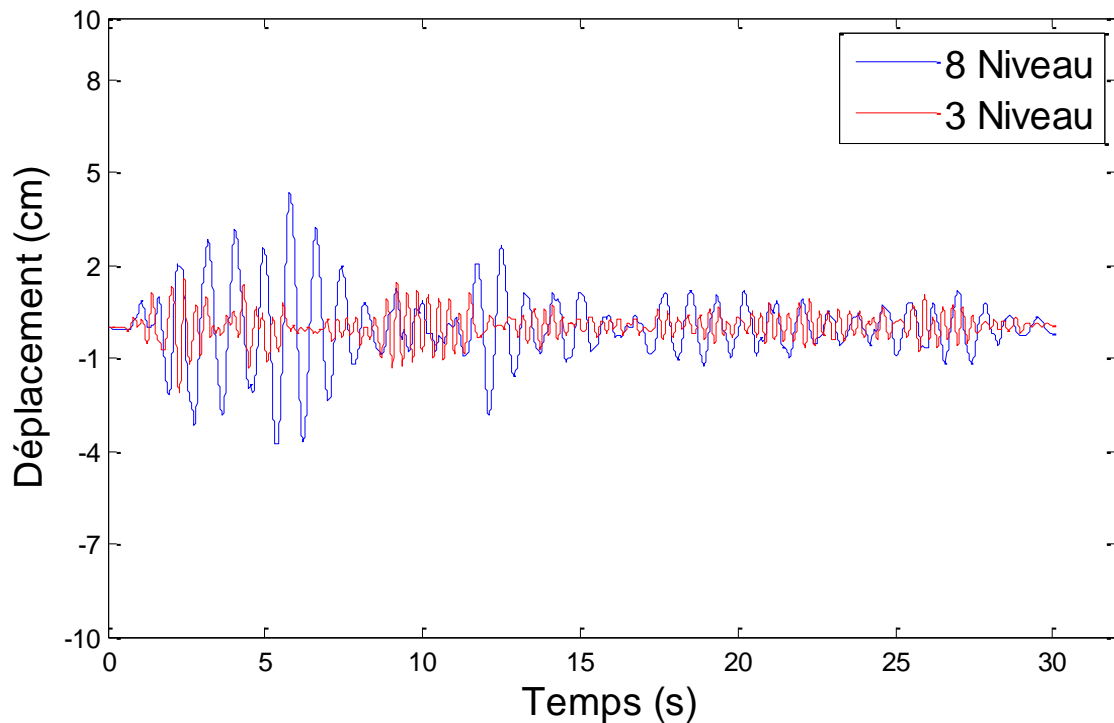


Fig. 3.4 Variation temporelle du déplacement au niveau 3 des deux structures (SP8-SP3).

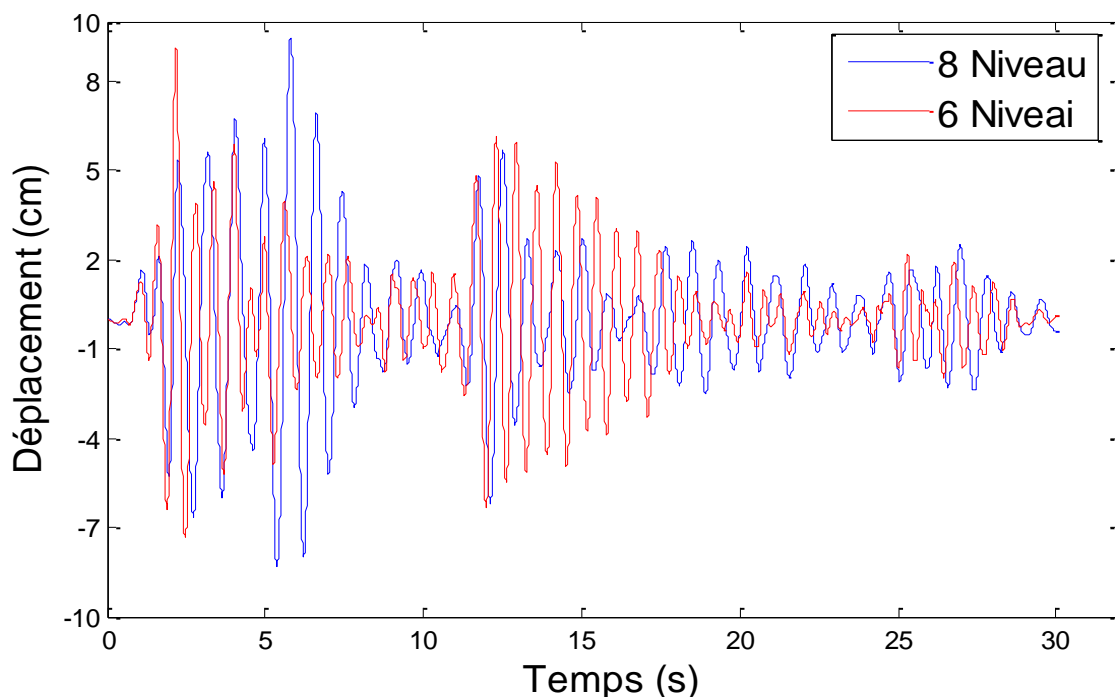


Fig. 3.5 Variation temporelle du déplacement au niveau 6 des deux structures (SP8-SP6).

❖ (Sp8-Sp3) :

Dans la figure (3.4), les courbes des réponses temporelles des déplacements des deux structures (SP3-SP8) au niveau du point de contact (niveau 03), sont superposés pour observer l'entrechoquement entre les deux structures. Cette figure montre que le déplacement positif maximal pour SP8 au niveau 03 est 4.38 cm à 5.79 sec et le déplacement négatif maximal observé est 3.82 à 5.35 sec. La figure montre également que le déplacement positif maximal pour SP3 est 1.59 à 2.445 sec et le déplacement négatif maximal est 2.13 à 2.28 sec. À travers cette figure, le maximum hors phase du mouvement est observé à 5.8 sec. Dans cet intervalle de temps, le déplacement relatif maximal est donné par $S = \max |u_1(t) - u_2(t)| = 4.49 \text{ cm}$. Qui représente la séparation analytique entre les deux structures.

❖ (SP6-SP8) :

Dans la figure (3.6), les courbes des réponses temporelles des déplacements des deux structures (SP6-SP8) au niveau du point de contact (niveau 06), sont superposés pour observer l'entrechoquement entre les deux structures. Cette figure montre que le déplacement positif maximal pour SP8 au niveau 06 est 9.43cm à 5.79 sec et le déplacement négatif maximal observé est 8.29 à 5.36 sec. La figure montre également que le déplacement positif maximal pour SP6 est 9.09 à 2.17 sec et le déplacement négatif maximal est 7.34 à 2.46 sec. À travers

cette figure le maximum hors phase du mouvement est observé à 2.755 sec. Dans cet intervalle de temps, le déplacement relatif maximal donné par $S = \max|u_1(t) - u_2(t)| = 10.01 \text{ cm}$. Qui représente la séparation analytique entre les deux structures.

III.5 Estimation de la distance de séparation

L'effet de l'entrechoquement se produit lorsque la distance de séparation entre les structures adjacentes n'est pas assez grande pour accommoder le mouvement relatif au cours d'un séisme [17]. Pour résoudre ce problème, les codes parasismiques donnent des formules pour calculer l'épaisseur du joint. Dans cette section, on va calculer la distance de séparation pour chaque pas de temps par les règles ABS, SRSS et DDC (voir chapitre 1). Les résultats obtenus sont comparés avec la distance de séparation analytique pour estimer le degré d'exactitude de chaque méthode.

$$S = u_1(t) + u_2(t) \quad \text{ABS} \quad (4.6)$$

$$S = \sqrt{u_1^2(t) + u_2^2(t)} \quad \text{SRSS} \quad (4.7)$$

$$S = \sqrt{u_1^2(t) + u_2^2(t) - \rho_{12}u_1(t)u_2(t)} \quad \text{DDC} \quad (4.8)$$

Les courbes (3.6) et (3.7) montrent la variation temporelle de la distance de séparation entre les structures étudiées.

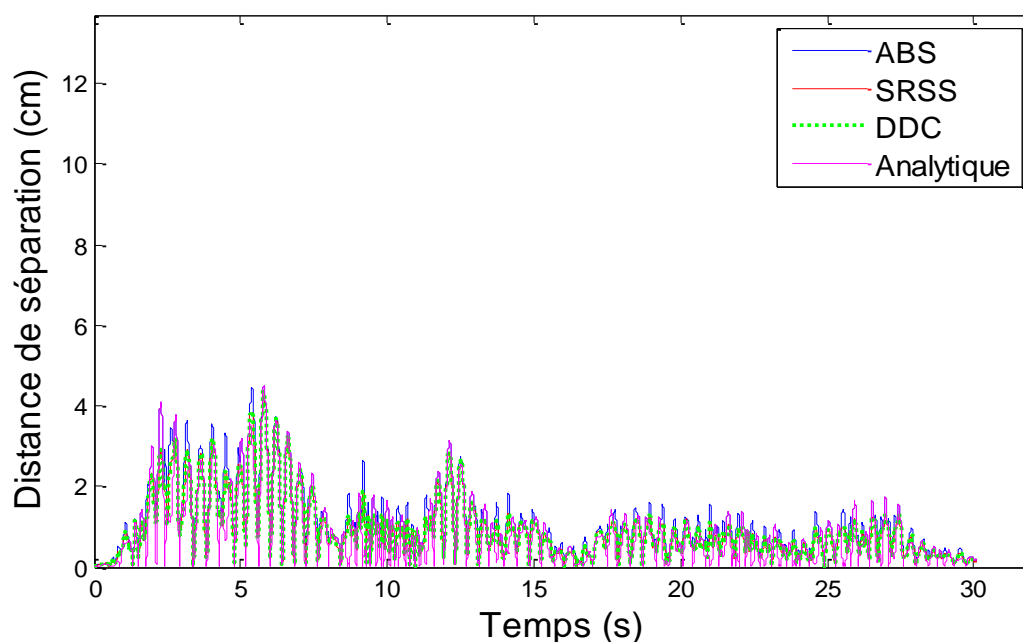


Fig. 3.6 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP3).

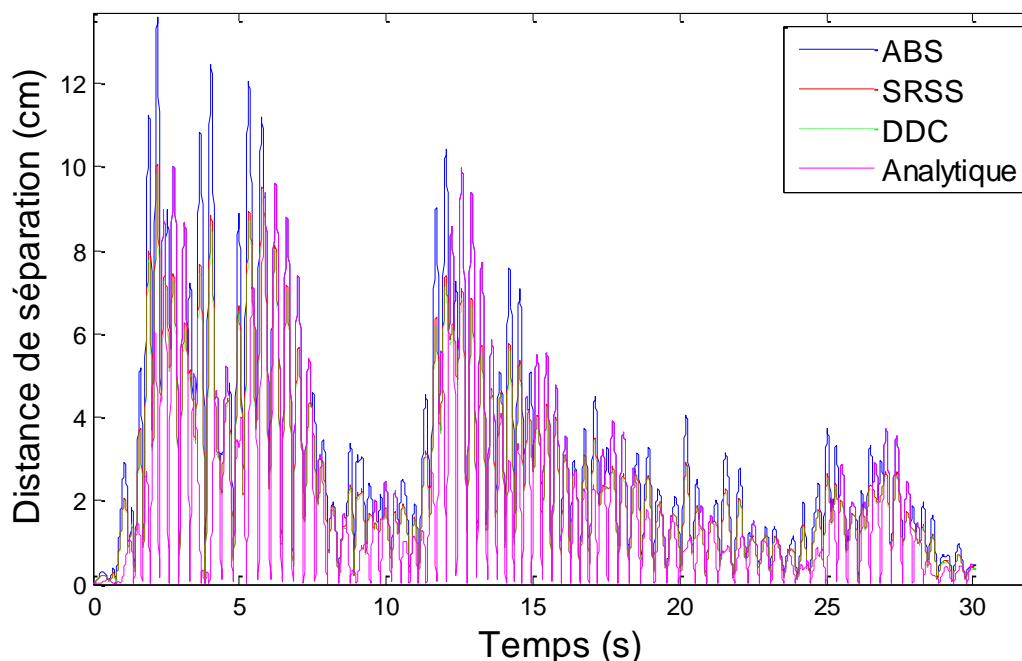


Fig. 3.7 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP6).

Tableau 3.8 Valeurs de la distance de séparation entre (SP8-SP3) et (SP8-SP6).

cas étudiée	ABS (cm)	SRSS (cm)	DDC (cm)	Analytique (cm)
SP8-SP3	4.4941	4.3851	4.3746	4.49
SP8-SP6	13.58	10.10	9.81	10.01

Les figures (3.6) et (3.7) montrent la variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP3) et (SP8-SP6). Les résultats présentés montrent que la méthode de la somme des déplacements absolue représentée par (ABS) est conservatrice et le conservatisme est excessif principalement quand les deux structures adjacentes ont des périodes propres presque semblables. La méthode de la différence spectrale (DDC) pourrait prédire la distance de séparation avec assez d'exactitude quand les structures adjacentes ont presque les mêmes périodes propres, mais elle donne en général un résultat conservateur lorsque les périodes fondamentales sont éloignées. La méthode de la racine carrée de la somme des carrées (SRSS) donne des résultats presque identiques à la méthode de la différence spectrale, qui est généralement non-conservatrice quand les périodes des deux structures sont semblables.

D'après ces résultats, on suggère d'utiliser la règle (ABS) lorsque les périodes fondamentales des deux structures adjacentes sont différentes, et d'utiliser les règles (SRSS) et (DDC) lorsque les périodes fondamentales sont presque semblables.

III.6 Simulation de la force de contact entre les structures

L'ampleur de la force de contact est simulée à l'aide d'un modèle de contact linéaire (voir chapitre 1). L'élément de contact est constitué d'un ressort linéaire supposé avoir la rigidité axiale de la poutre (fig. 3.8). La simulation de la force de contact est effectuée avec différentes distances de séparation. Les distances de séparation ont été ajustées pour représenter de 0%, 10%, 25%, 50% et 75% de la distance de séparation analytique.

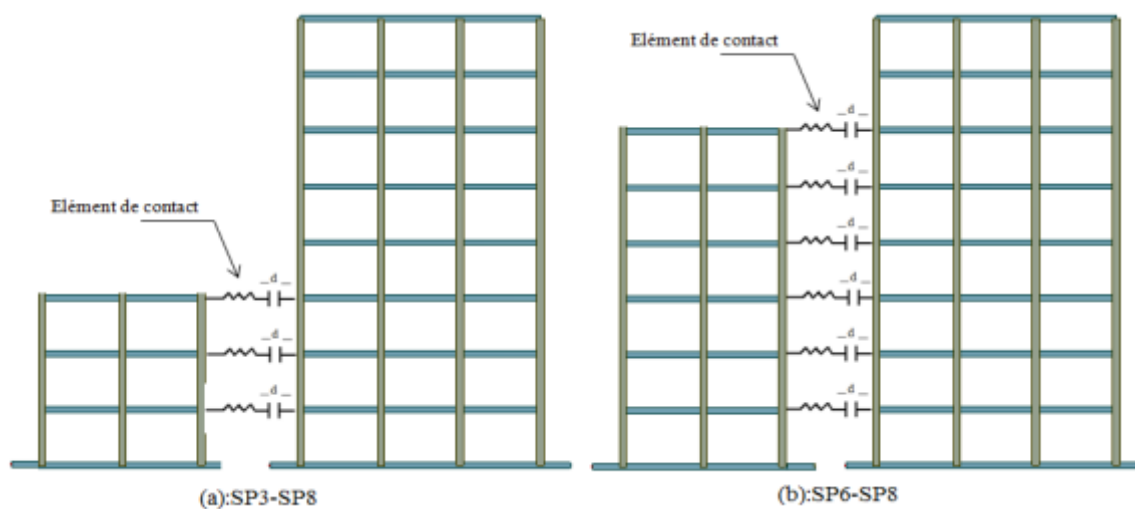


Fig.3.8 Vue en élévation de deux structures adjacentes, (a) (SP8-SP3), (b) (SP8-SP6).

Les courbes (3.9) et (3.10), montrent la variation temporelle de la force de contact avec 50%, 75% et 100% de la distance de séparation.

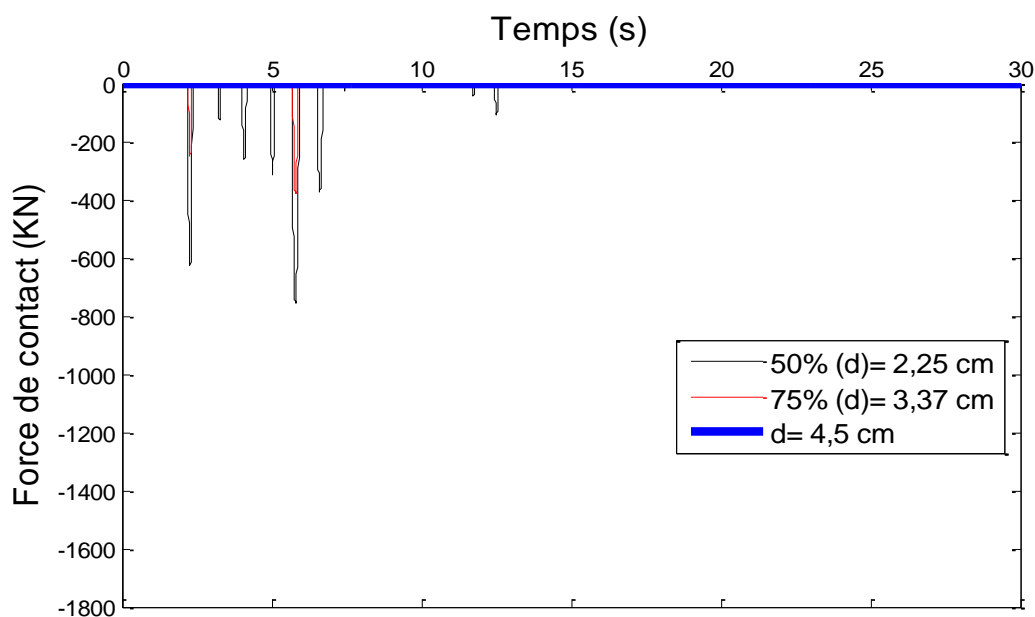


Fig. 3.9 Amplitude de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de séparation entre (SP3-SP8).

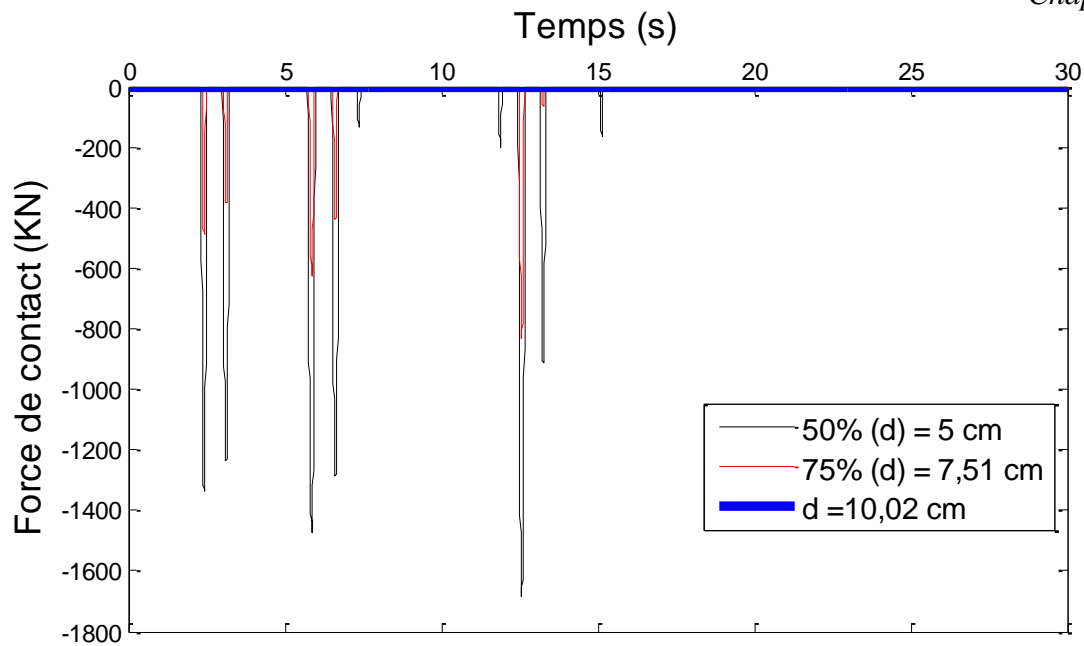


Fig. 3.10 Ampleur de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de Séparation entre (SP6-SP8).

Tableau 3.9 Résultats de la simulation de la force de contact (SP3-SP8).

Conditions	Distance de séparation (cm)	Force de contact (KN)	Nombre de contact
0	0	1.5178e+003	2780
10% (d)	0.45	1.3658e+003	1681
25% (d)	1.12	1.1395e+003	775
50% (d)	2.25	7.5789e+002	276
75% (d)	3.37	3.7964e+002	59
d	4.5	0	0

Tableau 3.10 Résultats de la simulation de la force de contact (SP6-SP8).

Conditions	Distance de séparation (cm)	Force de contact (KN)	Nombre de contact
0	0	3.3707e+003	3060
10% (d)	1.00	3.0330e+003	1710
25% (d)	2.50	2.5264e+003	864
50% (d)	5.00	1.6821e+003	326
75% (d)	7.51	8.3441e+002	150
d	10.02	0	0

Les tableaux (3.9) et (3.10) présentent les résultats de la simulation de l'ampleur de la force de contact entre deux structures adjacentes avec différentes distances de séparation qui ont été choisies en fonction de la valeur maximale du déplacement relatif. L'état de l'entrechoquement avec différentes valeurs de séparation est comparé avec le cas de non-entrechoquement. Les résultats indiquent que l'augmentation de la distance de séparation implique de la réduction de la force de contact. Le résultat présenté indique également que l'entrechoquement entre les structures adjacentes peut entraîner une réponse néfaste quand il n'y a aucune séparation ou l'espace de séparation est trop petit.

Pour mieux comprendre le comportement dynamique des structures adjacentes avec l'effet de l'entrechoquement, le nombre total d'impacts enregistré au cours de la durée du séisme est représenté en fonction de la distance de séparation analytique.

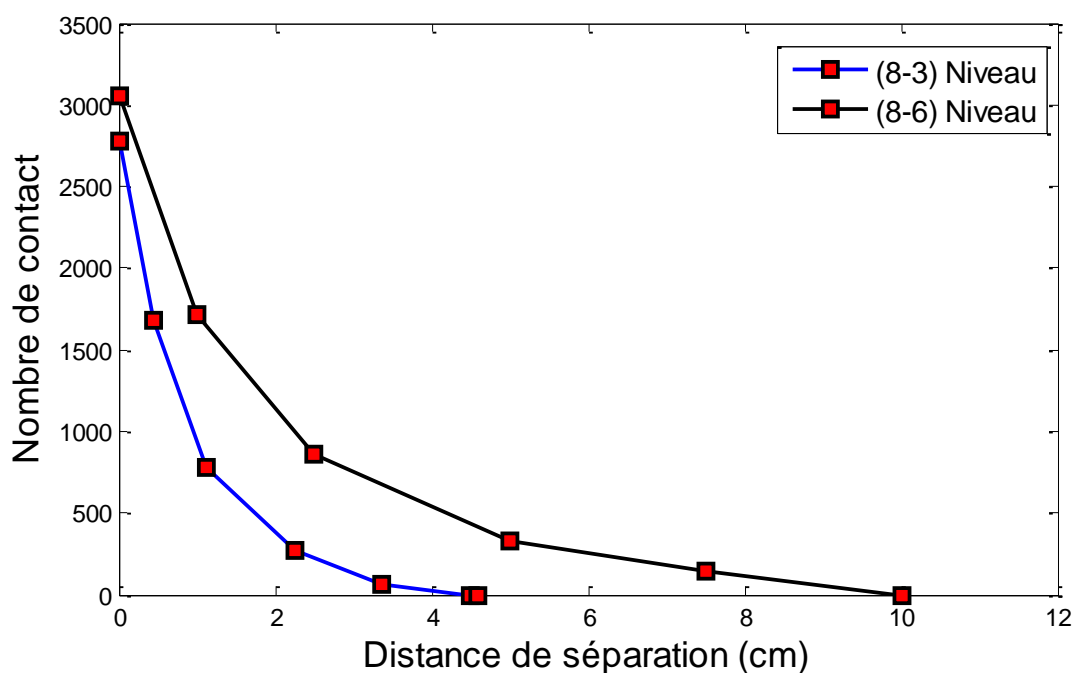


Fig. 3.11 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation.

Figure (3.11) montre la variation du nombre d'impacts avec l'augmentation de la distance de séparation analytique. On voit d'après ce graphe que le nombre total d'impacts diminue avec l'augmentation de la distance de séparation. De plus, le nombre total d'impacts est plus élevé entre (SP8-SP6) par rapport à (SP8-SP3). Ces résultats indiquent que lorsque des structures adjacentes ayant des périodes fondamentales presque similaires peuvent plus endommager que ces dernières ayant des périodes fondamentales différentes. Ceci peut s'expliquer par l'influence de la hauteur du bâtiment sur l'ampleur de la force de contact.

III.7 Influence de l'accélération du sol (PGA)

La valeur de l'accélération maximale en surface (Peak Ground acceleration) est un paramètre couramment utilisé pour catégoriser les séismes et en prédire leur nocivité. De nombreuses corrélations existent pour relier les réponses des structures au niveau des accélérations mesurées. Pourtant, le retour d'expérience a montré que des séismes de faible accélération pourraient être plus destructeurs que des séismes ayant des niveaux d'accélération élevé [29]. Alors on cherche à tracer l'évolution de la distance de séparation analytique en fonction de la valeur du PGA. C'est ce que présente la figure (3.12). La composante (N-S) de l'accélérogramme enregistré lors du séisme d'El-Centro (1940) est pondérée par des coefficients multiplicatifs variant de (0,25 à 3) afin d'obtenir des seuils d'accélérations maximales (PGA) variant de (0.0795 à 0.954).

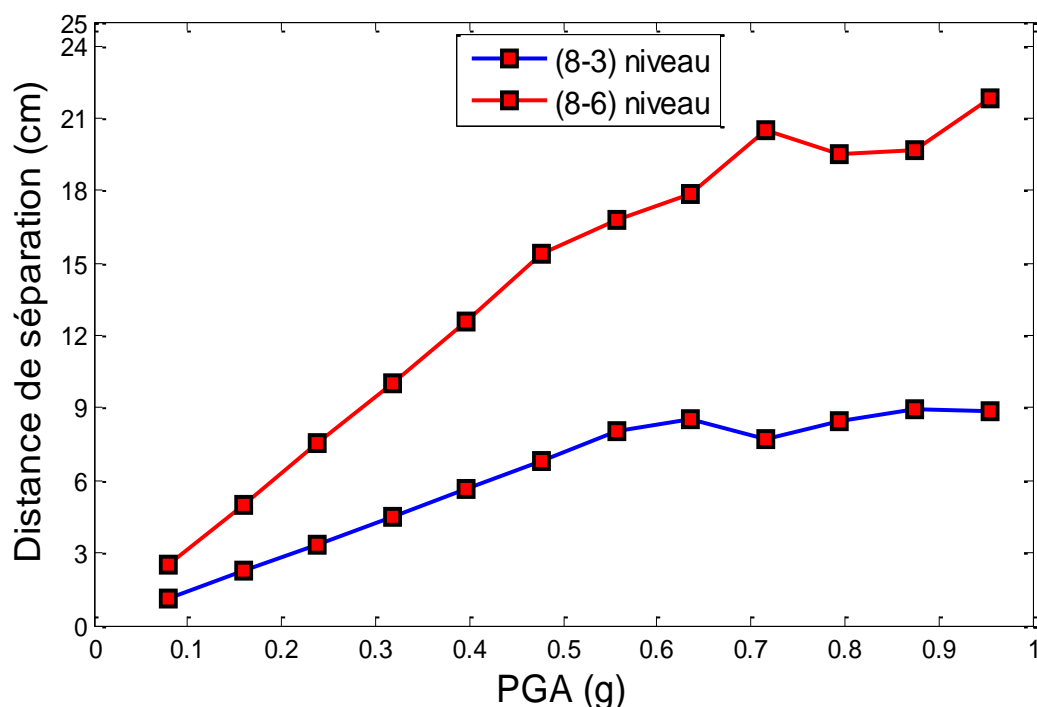


Fig. 3.12 Variation de la distance de séparation en fonction du PGA.

La figure (3.12) montre la variation de la distance de séparation en fonction de l'augmentation de la valeur de l'accélération maximale du sol (PGA). D'après la courbe, il est intéressant de noter que l'évolution (d-PGA) n'est pas strictement croissante. On voit d'après ce graphe que la distance de séparation maximale entre (SP8-SP3) est 8.96 cm observé à une accélération de ($2.75 \times \text{PGA} = 0.87\text{g}$) mais pour une valeur d'accélération de ($3 \times \text{PGA} = 0.95\text{g}$) la valeur a diminué à 8.88 cm. On observe également que la distance de séparation entre (SP8-SP6) est égale 20.48 pour une valeur d'accélération ($2.25 \times \text{PGA} = 0.71\text{g}$),

mais pour une valeur d'accélération ($2.5 \times \text{PGA} = 0.79\text{g}$) elle diminue à 19.52 cm. D'après ce résultat, on conclue que les caractéristiques des séismes jouent un rôle dominant pour spécifier la distance de séparation.

Pour étudier l'effet de l'accélération maximale en surface (PGA), le nombre total d'impacts enregistrés au cours de la durée du séisme sont représentés en fonction de la distance de séparation analytique et avec différentes valeurs de PGA variant de (0.0795 à 0.954) g.

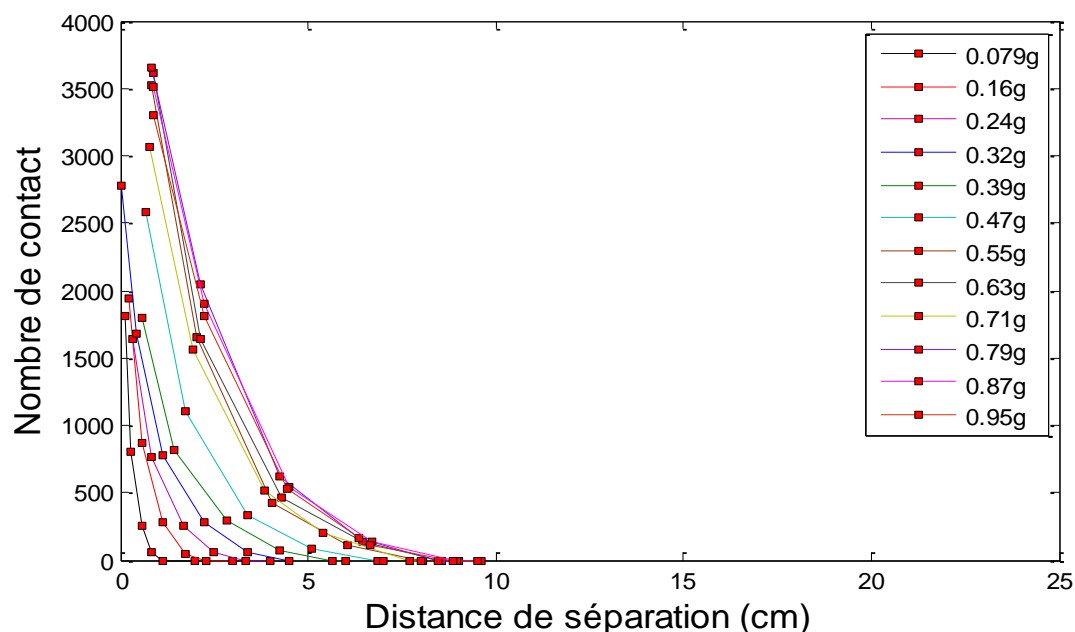


Fig.3.13 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP3-SP8).

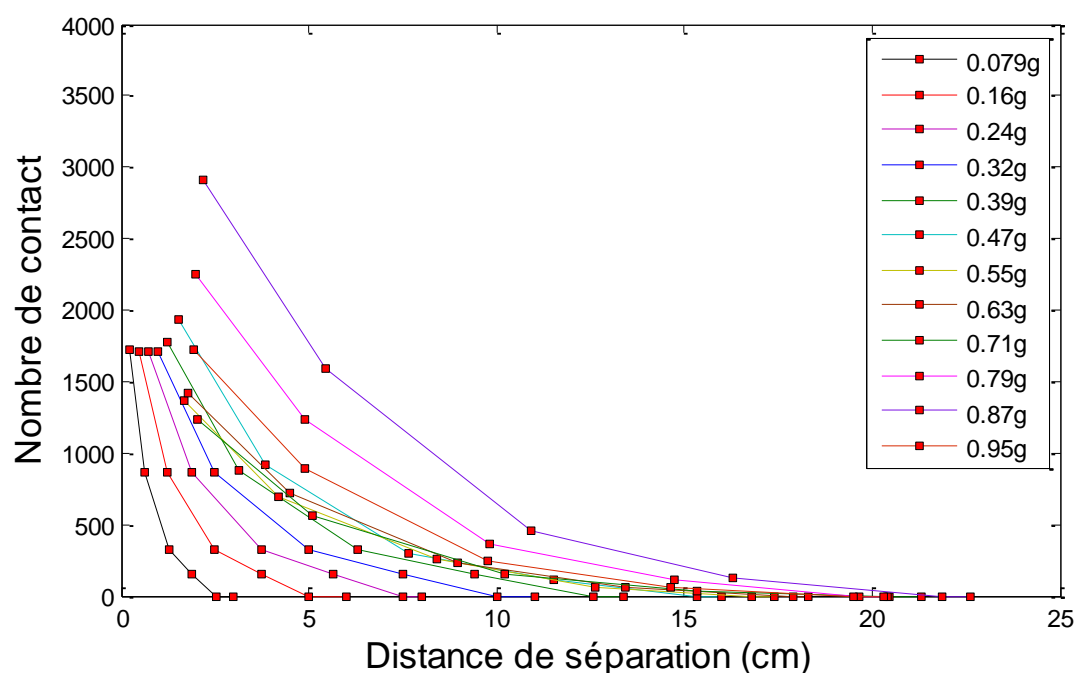


Fig. 3.14 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP6-SP8).

Les figures (3.13) et (3.14) montrent la variation du nombre d'impacts en fonction de l'augmentation de la distance de séparation et avec différentes valeurs de la PGA (Peak Ground Acceleration). D'après les figures, le nombre d'impacts diminue rapidement lorsque la distance de séparation augmente. En comparant les résultats correspondants avec différentes valeurs du PGA, on observe une légère diminution du nombre d'impacts. Ainsi dans ce cas, on peut dire que la probabilité de contact dépend également des caractéristiques du séisme.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation mathématique des structures adjacentes a été illustrée et sa mise en œuvre par l'analyse dynamique non-linéaire est présentée, visant à évaluer la distance de séparation. Les résultats obtenus montrent que :

Les règles SRSS et DDC sont capables de prédire la distance de séparation requise dans le cas de la non-linéarité. Par ailleurs, la règle SRSS donne des résultats conservateurs ou non-conservateurs en fonction de la relation entre les périodes propres. La méthode ABS donne des résultats conservateurs et des fois, le conservatisme est excessif ce qui la rend difficile à mettre en œuvre (surtout quand deux structures ont des caractéristiques dynamiques similaires), seule la méthode DDC est capable de prendre en compte la différence de phase de vibration entre les structures adjacentes.

L'analyse de l'ampleur de la force de contact des structures adjacentes avec différentes distances de séparation et avec différentes valeurs de l'accélération maximale du sol (PGA) ont été mise en évidence. Les résultats indiquent que l'augmentation de la distance de séparation résulte de la réduction de la force de contact.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE LA DISTANCE DE SEPARATION ENTRE LES STRUCTURES ISOLEES A LA BASE

Chapitre IV EVALUATION DE LA DISTANCE DE SEPARATION ENTRE LES STRUCTURES ISOLEES A LA BASE

IV.1 Introduction

L'isolation sismique est une alternative admise de conception pour la réduction des forces sismiques sur la superstructure. Cependant, au cours d'un séisme majeur, l'effet de l'entrechoquement peut se produire entre les structures au niveau de la base ou au niveau des planchers. Afin d'étudier l'effet de l'entrechoquement entre les structures isolées à la base, ce chapitre est divisé en deux parties qui seront consacrées à une application numérique à l'aide du logiciel ETABS v9.0. Dans la première partie, une analyse dynamique non-linéaire par accélérogramme sera réalisée pour estimer la distance de séparation entre les structures isolées. Dans la deuxième partie, une simulation de l'ampleur de la force de contact sera évaluée. L'influence de la variation de la distance de séparation et l'accélération maximale du sol (PGA) seront étudiées d'une façon paramétrique.

IV.2 Modélisation de la structure

Une modélisation (2D) par éléments finis a été effectuée par logiciel ETABS v9.0. La superstructure est modélisée comme un système à plusieurs degrés de liberté (*MDOF*), et les masses sont concentrées aux niveaux des étages, en supposant que cette dernière reste élastique linéaire au cours de l'excitation sismique.

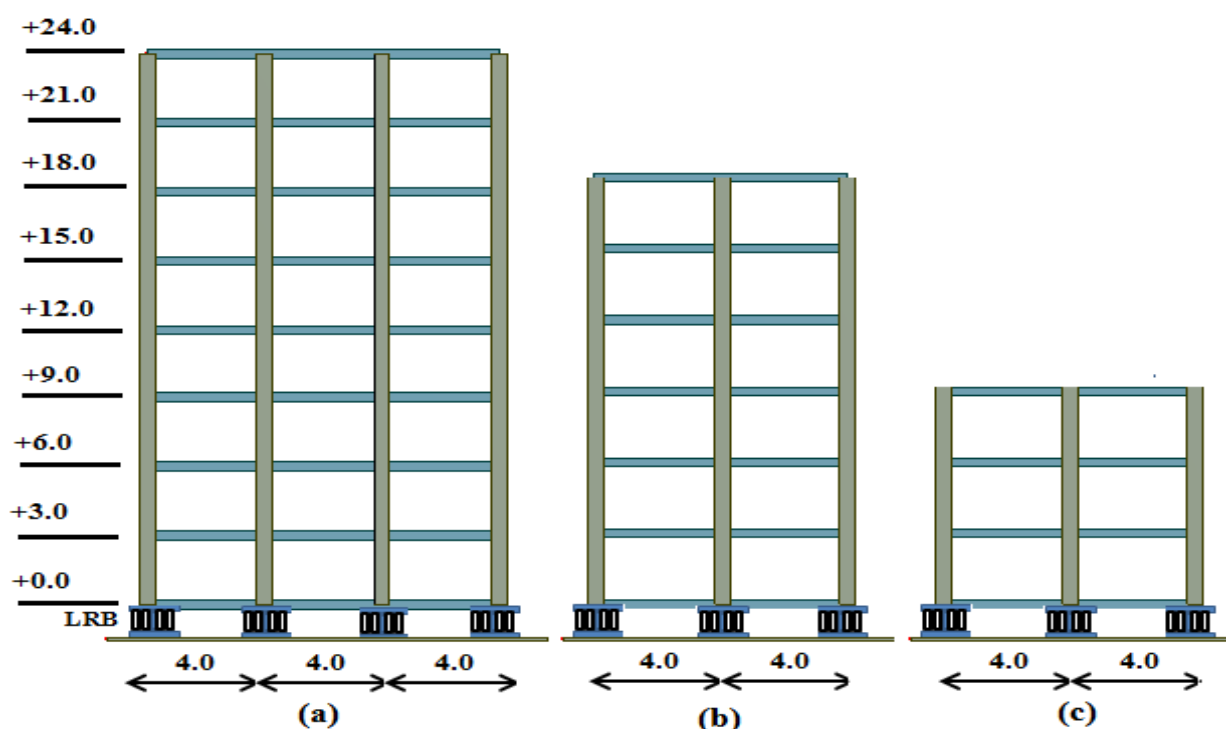


Fig.4.1 Modélisation en éléments finis des structures, (a) : 8 Niveaux (SP8), (b) : 6 Niveaux (SP6),

(c) : 3 Niveaux (SP3).

IV.3 Modélisation du système d'isolation sismique

Les appuis utilisés dans cette étude sont en élastomère fretté avec un amortisseur en tige de plomb LRB (lead rubber bearing). Le comportement du système d'isolation est effectué par un modèle bilinéaire (fig.4.2), qui est un modèle plus représentatif et plus approprié, puisqu'il représente d'une manière satisfaisante la réponse sous le chargement cyclique. Les trois paramètres qui déterminent le modèle bilinéaire sont la limite élastique (f_y), la rigidité linéaire (k_1) et la rigidité non-linéaire (k_2). Les caractéristiques des appuis parasismiques (LRB) pour les 03 structures sont récapitulées dans l'annexe.

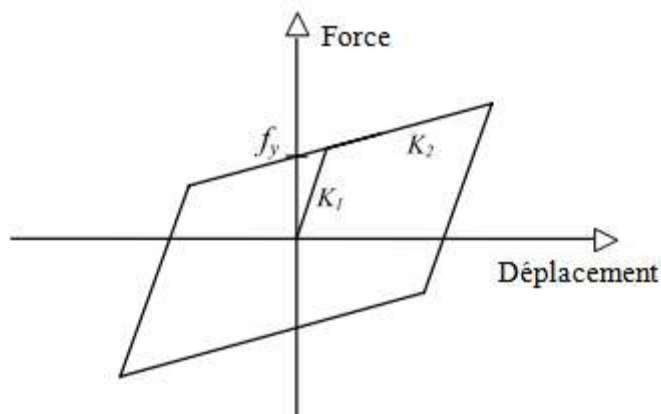


Fig.4.2 Modélisation bilinéaire du comportement du système d'isolation.

IV.4 Analyse et interprétation des résultats

IV.4.1 Analyse modale

Les résultats de l'analyse modale des structures sont figurés dans les tableaux (4.1), (4.2) et (4.3).

Tableau 4.1 Résultats de l'analyse modale du portique (SP8).

Mode	f_n (HZ)	T_n (sec)	U_x	$sumU_x$
1	0.38	2.57	99.81	99.81
2	2.38	0.42	0.17	99.86
3	5	0.20	0.011	99.99
4	8.33	0.12	0.0018	99.99
5	12.19	0.082	0.0004	99.99
6	16.39	0.061	0.0001	99.99
7	22.72	0.044	0	100
8	30.30	0.033	0	100

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse modale du portique (SP6).

Mode	f_n (HZ)	T_n (sec)	U_x	$sumU_x$
1	0.49	2.04	99.84	99.84
2	3.22	0.31	0.15	99.98
3	7.69	0.13	0.0074	99.99
4	13.51	0.074	0.0009	99.99
5	21.27	0.047	0.0001	99.99
6	30.30	0.033	0.0001	100

Tableau 4.3 Résultats de l'analyse modale du portique (SP3).

Mode	f_n (HZ)	T_n (sec)	U_x	$sumU_x$
1	1.05	0.95	99.91	99.91
2	8.33	0.12	0.079	99.99
3	18.86	0.053	0.0026	100

Les tableaux (4.1), (4.2) et (4.3) présentent les résultats de l'analyse modale des 03 portiques étudiés. Les résultats obtenus montrent que l'effet du système d'isolation est d'assouplir le bâtiment par le rallongement de la période fondamentale de la structure à une valeur plus grande par rapport à la valeur obtenue pour les structures encastrees à la base. Par conséquent, on peut dire que la réponse des structures isolées est contrôlée par le premier mode. En d'autres termes, la contribution des modes supérieurs dans la réponse des structures isolées est négligeable ce qui est le contraire dans le cas des structures conventionnelles.

IV.4.2 Analyse dynamique non-linéaire par accélérogramme

On utilise dans cette analyse la composante (N-S) de l'accélération enregistrée lors du séisme d'El-Centro (1940). L'accélération max (PGA) est de 0.318g avec une durée de 31.18 secondes.

Les courbes qui montrent la variation temporelle du déplacement au niveau du point de contact pour chaque structure, sont représentées sur les figures (4.3), (4.4).

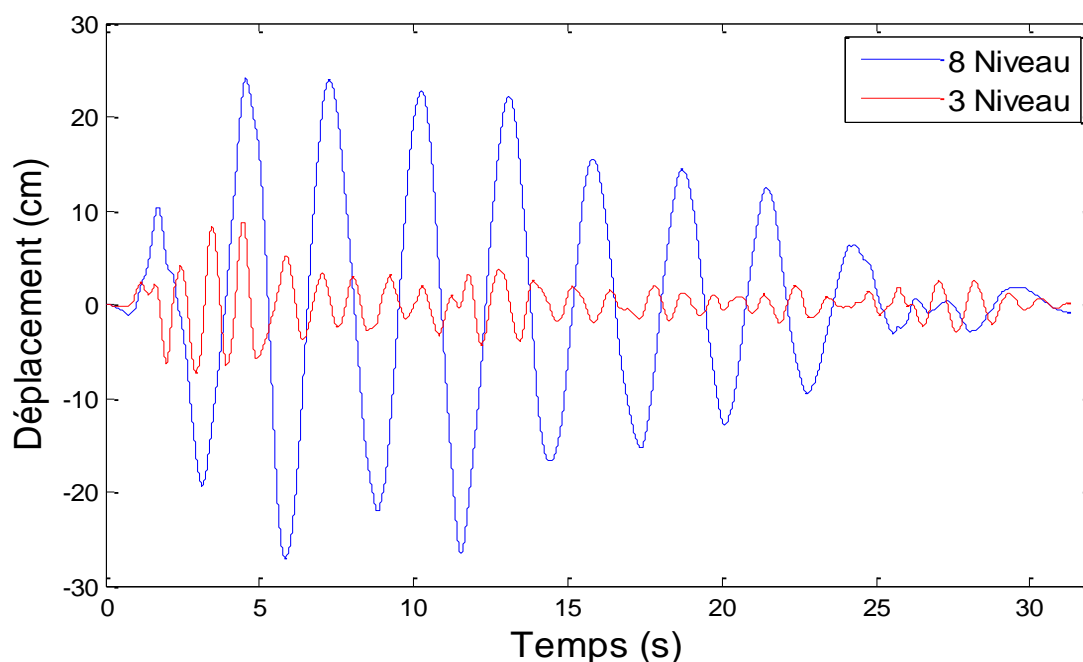


Fig.4.3 Variation temporelle du déplacement au niveau 3 des deux structures (SP8-SP3).

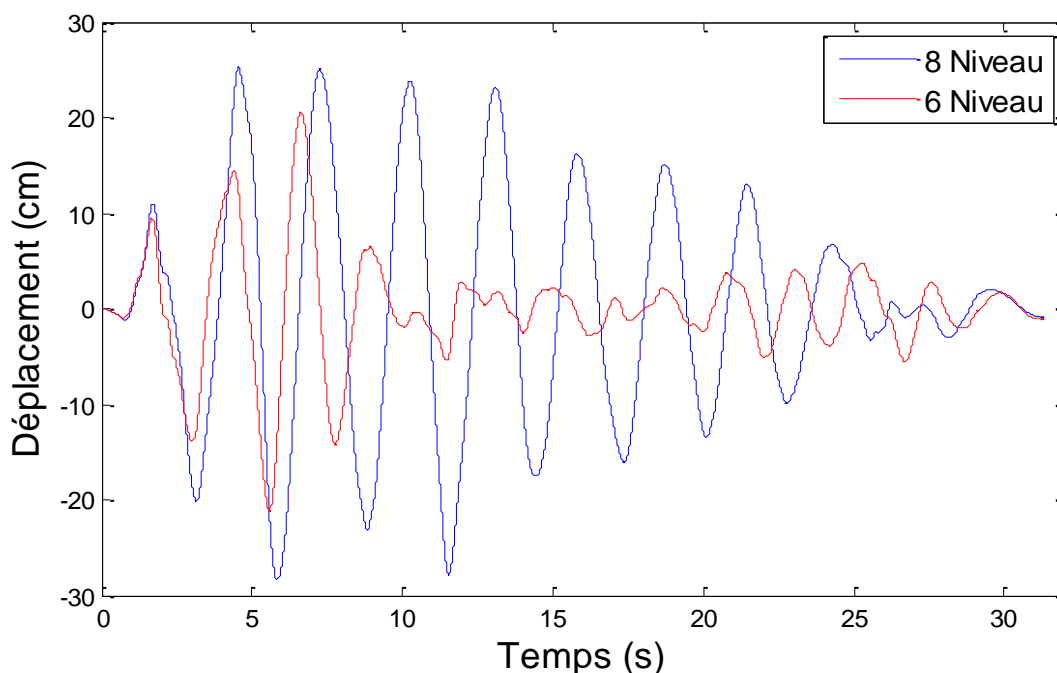


Fig.4.4 Variation temporelle du déplacement au niveau 6 des deux structures (SP8-SP6).

❖ (Sp8-Sp3) :

La courbe de la réponse temporelle du déplacement des deux structures (SP3-SP8) au niveau du point de contact (niveau 03), montre que le déplacement positif maximal pour SP8 au niveau 03 est 24.13 cm à 5.55 sec et le déplacement négatif maximal observé est 27.07 à 5.84 sec. La figure montre également que le déplacement positif maximal pour SP3 est 8.82 à 4.46sec et le déplacement négatif maximal est 7.42 à 2.95sec. À travers cette figure, le maximum hors phase du mouvement est observé à 5.86 sec. Dans cet intervalle de temps, le déplacement relatif maximal (séparation analytique) donné par $S = \max |u_1(t) - u_2(t)| = 32.17\text{cm}$.

❖ (Sp8-Sp6) :

La courbe de la réponse temporelle du déplacement des deux structures (SP6-SP8) au niveau du point de contact (niveau 06), montre que le déplacement positif maximal pour SP8 au niveau 06 est 25.33 cm à 4.55 sec et le déplacement négatif maximal observé est 28.36 à 5.84 sec. La figure montre également que le déplacement positif maximal pour SP6 est 20.59 à 6.62sec et le déplacement négatif maximal est 21.14 à 5.58sec. À travers cette figure, le maximum hors phase du mouvement est observé à 7.54 sec. Dans cet intervalle de temps, le déplacement relatif maximal (séparation analytique) donné par $S = \max |u_1(t) - u_2(t)| = 31.56\text{cm}$.

IV.5 Estimation de la distance de séparation

Les codes parasismiques attirent l'attention sur le phénomène de l'entrechoquement entre les structures isolées à la base. L'approche généralement adoptée, est la même que celle des structures conventionnelles. Dans cette section, on va calculer la variation temporelle de la distance de séparation entre deux structures isolées à la base par les règles ABS, SRSS et DDC (voir chapitre 1). Les résultats obtenus sont comparés avec la distance de séparation analytique.

Les courbes (4.5) et (4.6) montrent la variation temporelle de la distance de séparation entre les structures étudiées.

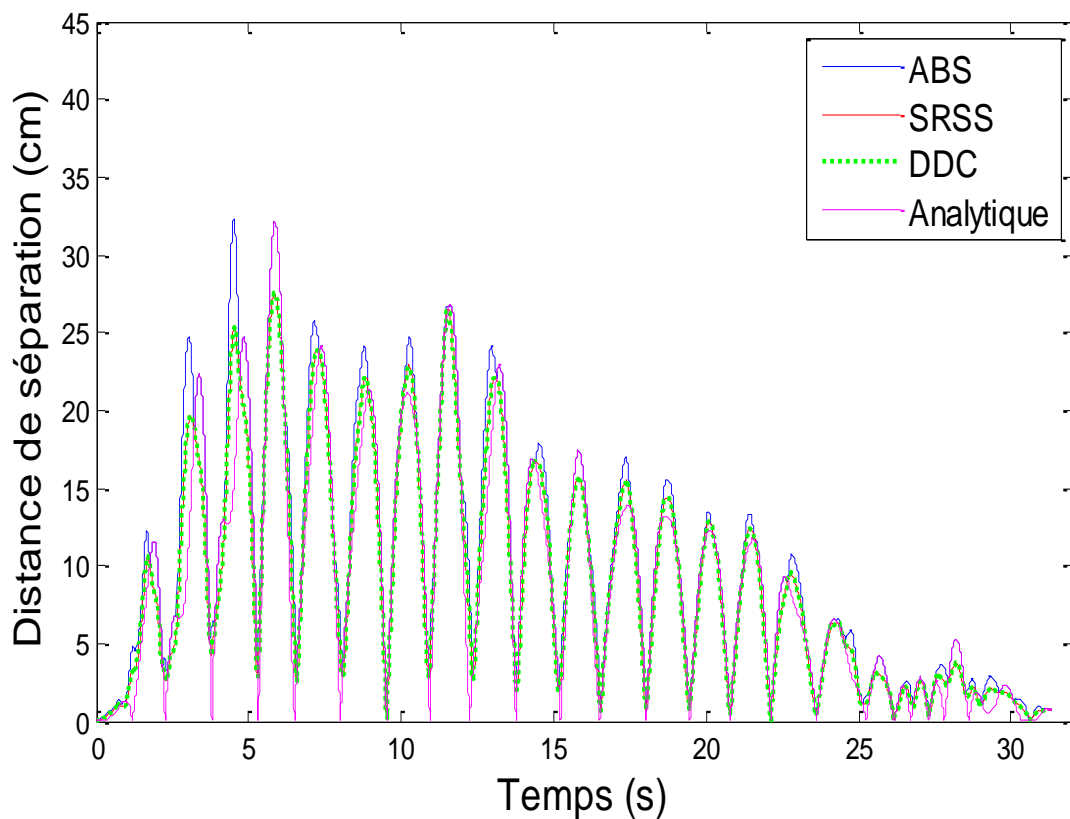


Fig. 4.5 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP3).

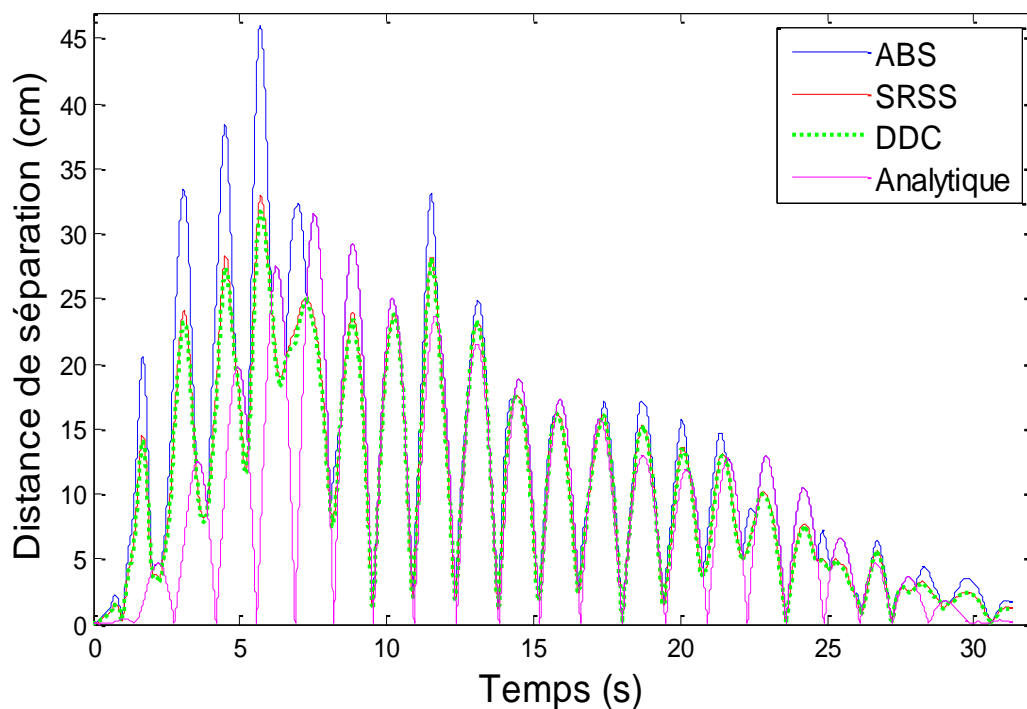


Fig. 4.6 Variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP6).

Tableau 4.4 Valeurs de la distance de séparation entre (SP8-SP3) et (SP8-SP6).

Cas étudiée	ABS (cm)	SRSS (cm)	DDC (cm)	Analytique (cm)
SP8-SP3	32.273	27.54	27.51	32.17
SP8-SP6	46.01	32.91	31.68	31.56

Les figures (4.5) et (4.6) montrent la variation temporelle de la distance de séparation entre (SP8-SP3) et (SP8-SP6). Les résultats présentés montrent que la distance de séparation éventuelle entre deux structures sur les isolateurs peut atteindre des valeurs décimétriques, plus grandes par rapport aux valeurs obtenues pour les structures encastées à la base, en raison des déplacements importants des appuis parasismiques au cours du séisme. D'après les résultats obtenus, on peut voir clairement que la règle ABS donne des résultats très excessifs essentiellement quand les structures adjacentes ont des caractéristiques dynamiques similaires. Les méthodes DDC et SRSS peuvent prédire la distance de séparation avec assez d'exactitude particulièrement quand les structures adjacentes ont presque les mêmes périodes propres, mais donnent des résultats non conservatives lorsque les structures adjacentes ont des périodes fondamentales différentes.

IV.6 Simulation de la force de contact entre les structures

La simulation de la force de contact est effectuée avec différentes distances de séparation. Les distances de séparation qui ont été ajustées pour représenter de 0%, 10%, 25%, 50%, et 75% de la distance de séparation analytique.

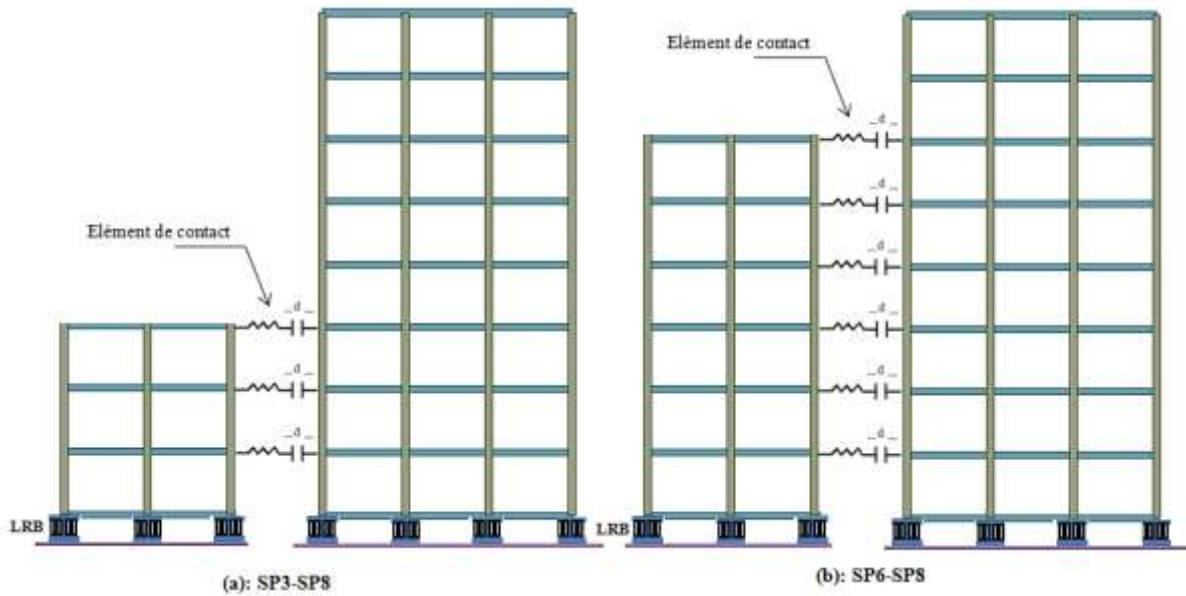


Fig.4.7 Vue en élévation de deux structures adjacentes, (a) (SP8-SP3), (b) (SP8-SP6).

Les courbes (4.8) et (4.9) montrent la variation temporelle de la force de contact avec 50%, 75% et de 100% de la distance de séparation analytique.

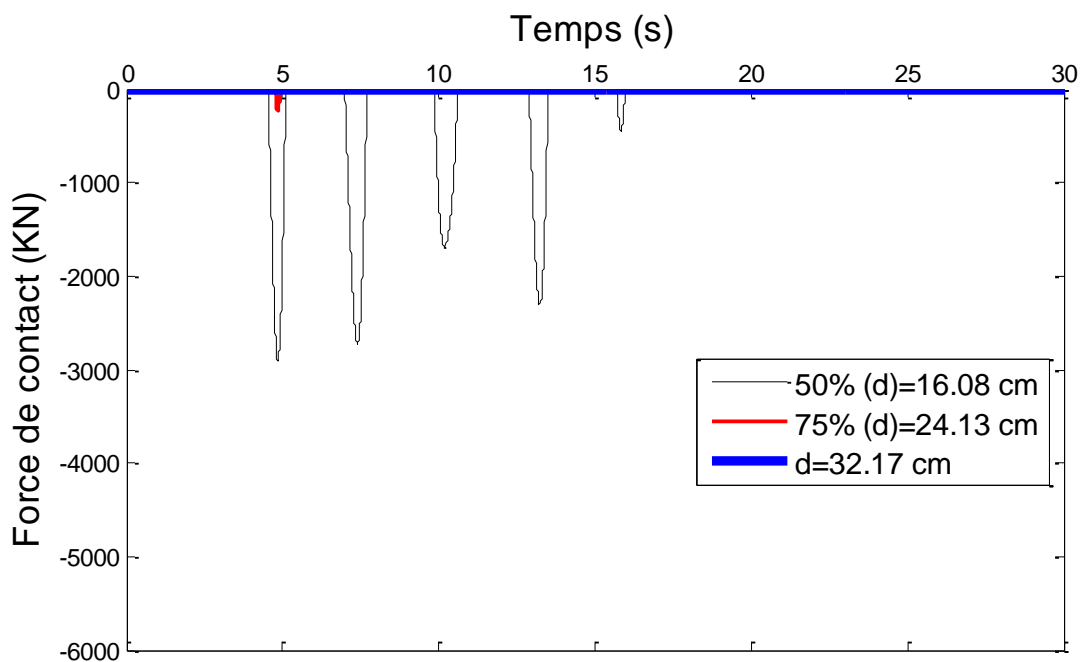


Fig. 4.8 Ampleur de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de séparation entre (SP3-SP8).

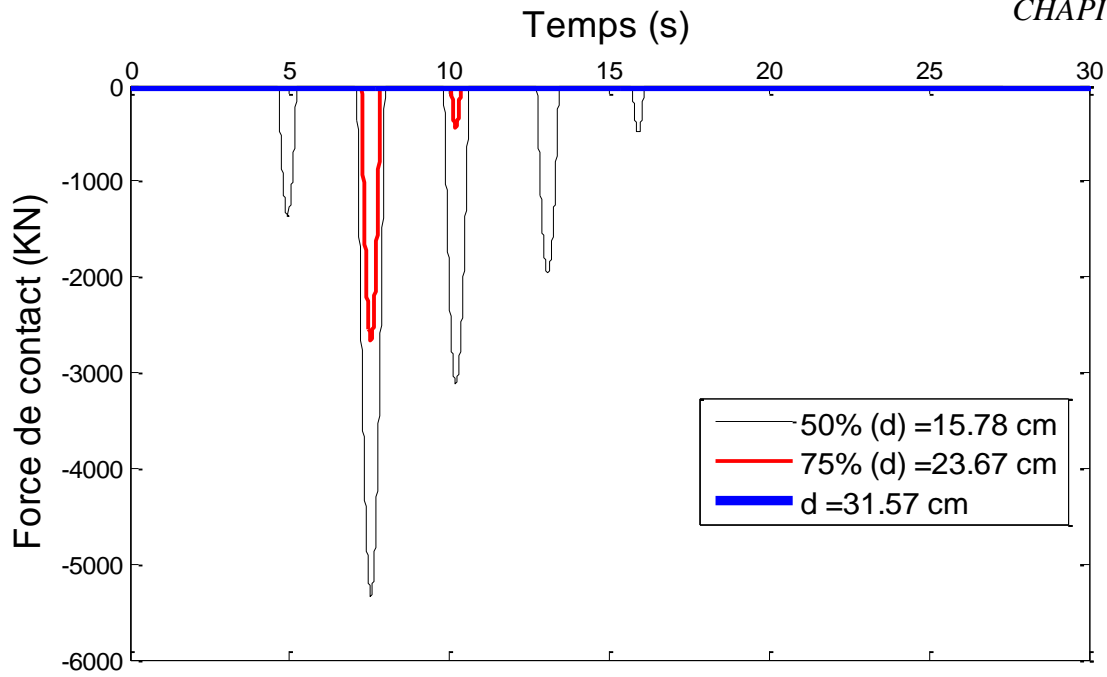


Fig. 4.9 Ampleur de la force de contact en fonction du temps avec différentes distances de séparation entre (SP6-SP8).

Tableau 4.5 Résultats de la simulation de la force de contact (SP3-SP8).

Conditions	Distance de séparation (cm)	Force de contact (KN)	Nombre de contact
0	0	8.3367e+003	3101
10% (d)	3.21	7.2526e+003	2141
25% (d)	8.04	5.6214e+003	1529
50% (d)	16.08	2.9061e+003	586
75% (d)	24.13	1.8744e+002	34
d	32.17	0	0

Tableau 4.6 Résultats de la simulation de la force de contact (SP6-SP8).

Conditions	Distance de séparation (cm)	Force de contact (KN)	Nombre de contact
0	0	1.0661e+004	3137
10% (d)	3.16	9.5934e+003	2186
25% (d)	7.89	7.9960e+003	1505
50% (d)	15.78	5.3313e+003	658
75% (d)	23.67	2.6667e+003	178
d	31.57	0	0

Les tableaux (4.9) et (4.10) présentent les résultats de la simulation de l'ampleur de la force de contact entre deux structures isolées à la base avec différentes distances de séparation qui sont choisies en fonction de la valeur maximale du déplacement relatif. Les résultats indiquent que l'augmentation de la distance de séparation implique une légère diminution des valeurs de la crête de la force d'impact. Par ailleurs, ces résultats montrent que l'ampleur de la force de contact atteint des valeurs plus grandes par rapport aux valeurs obtenues pour les structures encastrees à la base. Donc, si le risque de dommage dû à la déformation structurale est réduit, le risque de dommage dû à l'impact peut être augmenté avec l'utilisation du système d'isolation à la base.

Le nombre total d'impacts enregistrés au cours de la durée du séisme est représenté en fonction de la distance de séparation analytique dans la figure (4.10).

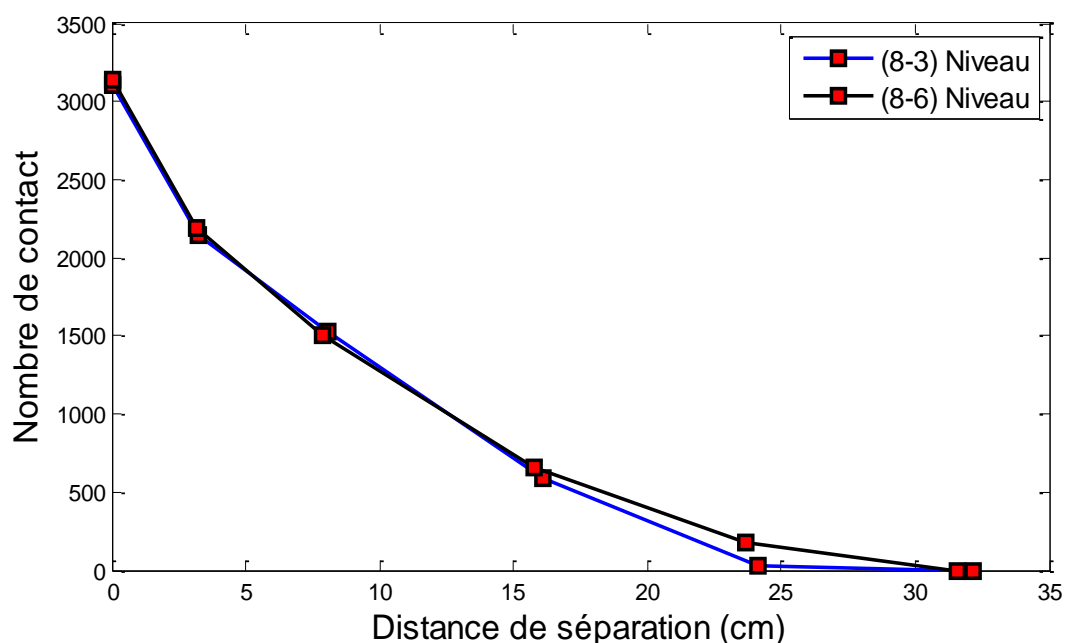


Fig.4.10 Variation du nombre total de contact en fonction de la distance de séparation.

La figure (4.10) montre la variation du nombre d'impacts en fonction de la distance de séparation analytique. On voit d'après ce graphe que le nombre total d'impacts diminue avec l'augmentation de la distance de séparation. Cependant, on constate que la relation entre le nombre de contacts et la distance de séparation analytique est presque la même entre (SP3-SP8) et (SP6-SP8). Cela peut s'expliquer par le fait que les déplacements horizontaux des structures isolées sont approximativement identiques sur toute la hauteur

IV.7 Influence de l'accélération du sol (PGA)

Dans cette section, pour un accélérogramme donné, on cherche à tracer l'évolution de la distance de séparation analytique en fonction de la valeur du PGA. C'est ce qui est présenté dans la figure (4.11). L'accélérogramme est pondéré par des coefficients multiplicatifs afin d'obtenir des seuils d'accélérations maximales (PGA) variant de (0.0795 à 0.954) g.

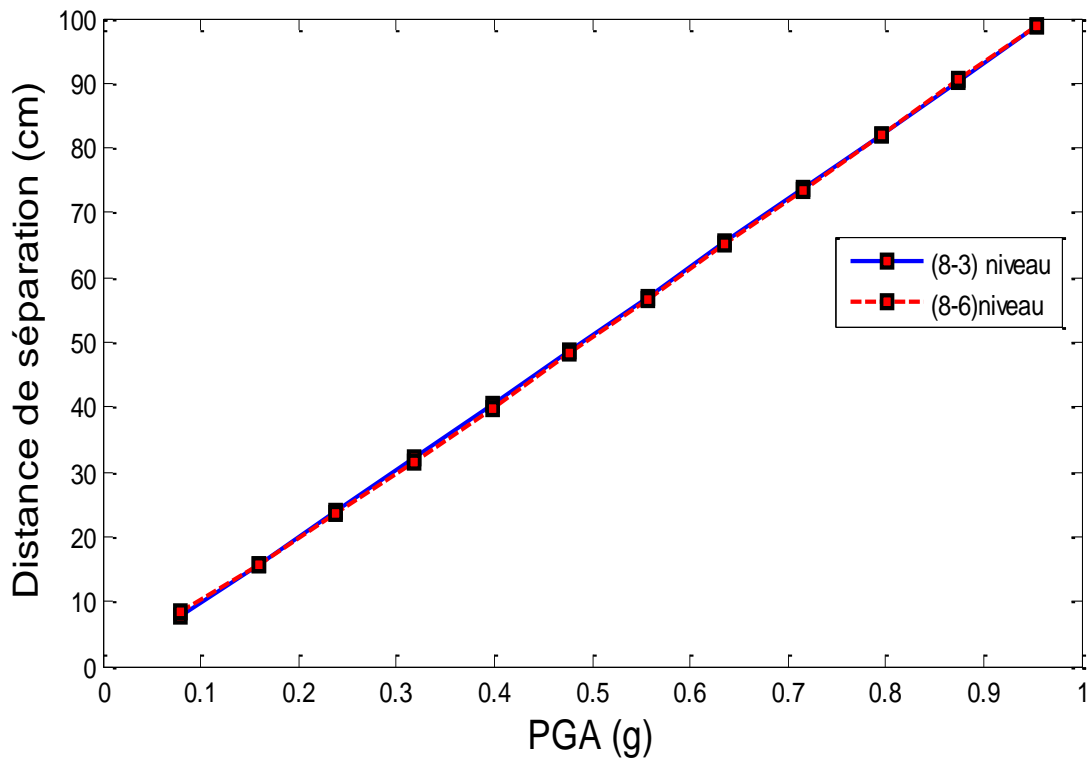


Fig. 4.11 Variation de la distance de séparation en fonction du PGA.

La figure (4.11) montre la variation de la distance de séparation en fonction de la valeur maximale du sol (PGA). D'après la courbe, il est intéressant de noter que l'évolution (d-PGA) est strictement croissante. Cependant, on observe presque la même distance de séparation entre (SP8-SP6) et (SP8-SP3). Cela s'explique par le fait que les structures isolées à la base peuvent glisser approximativement en phase gardant approximativement la même distance de séparation.

Les figures (4.12) et (4.13) montrent la variation du nombre d'impacts enregistrés au cours de la durée du séisme en fonction de l'augmentation de la distance de séparation analytique.

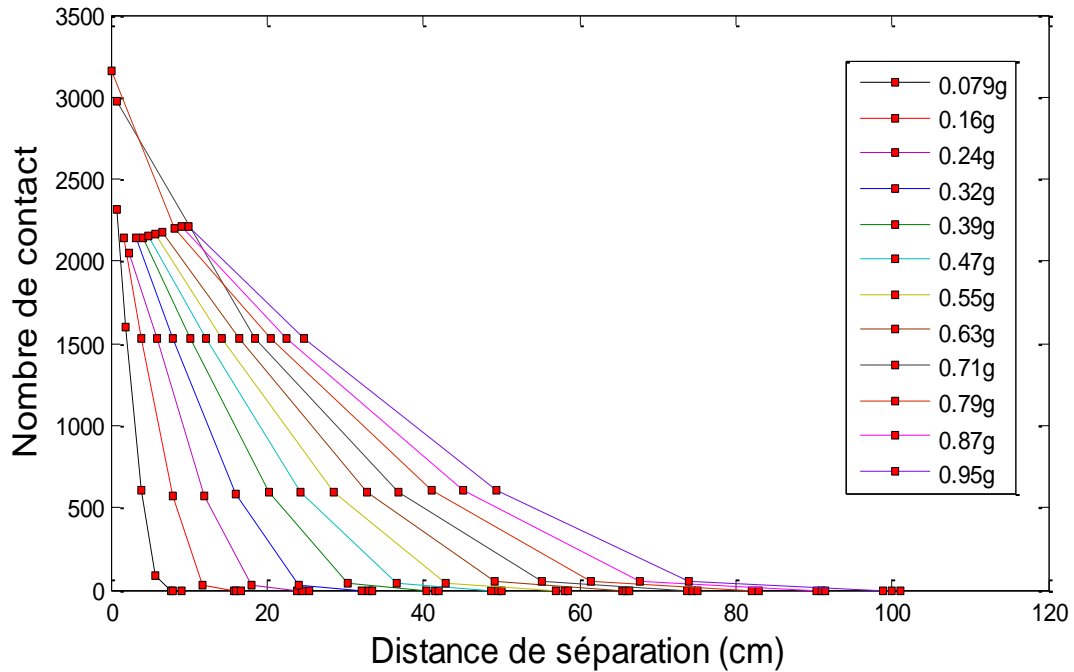


Fig.4.12 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP3-SP8).

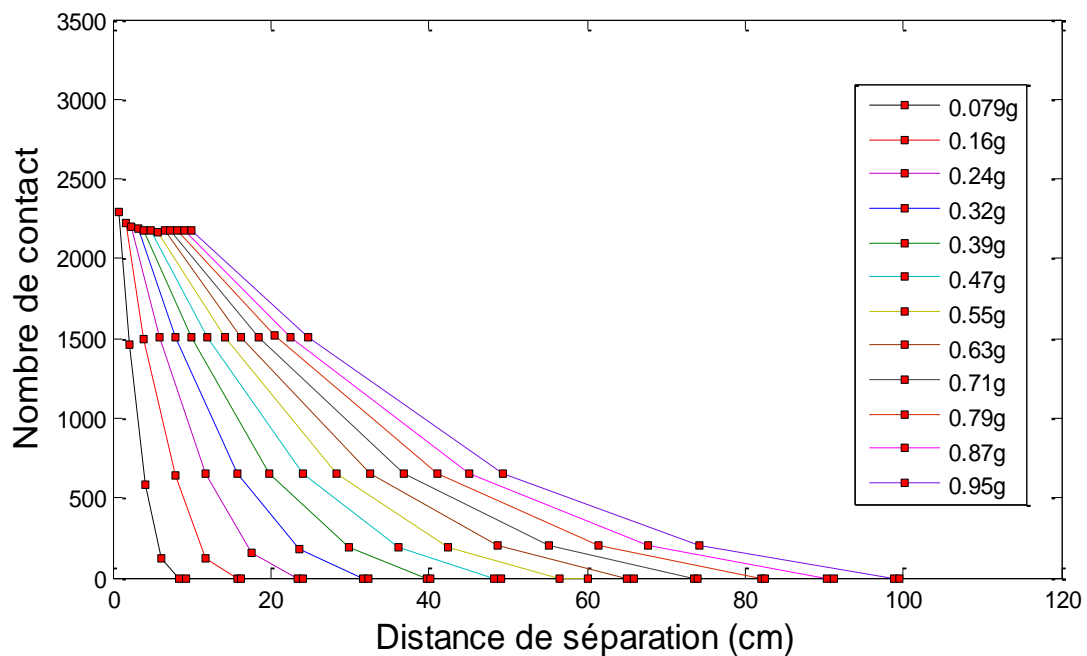


Fig.4.13 Variation du nombre de contacts en fonction de la distance de séparation entre (SP6-SP8).

D'après les figures (4.12) et (4.13), on constate que le nombre de contacts diminue avec l'augmentation de la distance de séparation. Dans ce cas, le nombre de contacts est approximativement le même pour toutes les valeurs du (PGA), puisque les deux structures tendent à glisser dans la même direction, gardant l'espace entre elles approximativement constant. Il s'agit d'un accouplement naturel qui se produit, car le modèle suppose que les fondations se déplacent exactement avec le déplacement du sol.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a concerné à une modélisation mathématique des structures adjacentes sur le système d'isolation à la base. Les résultats obtenus indiquent que la distance de séparation entre deux structures isolées à la base atteint des valeurs décimétriques. Par ailleurs, la simulation de l'ampleur de la force de contact montre que le risque de dommages produit à l'entrechoquement peut-être être augmenté avec l'utilisation de dispositifs d'isolation à la base.

En fin, la mise en œuvre des dispositifs supplémentaires de dispositions d'énergie pour atténuer les effets néfastes du martèlement entre les structures isolées est nécessaire.

CHAPITRE V

COMPARAISON ENTRE LES CODES

PARASISMIQUES

Chapitre V COMPARAISON ENTRE LES CODES PARASISMIQUES

V.1 Introduction

Il n'est pas rare de trouver des structures adjacentes construites en zones sismiques actives, sans suivre les clauses des codes. Au cours d'un séisme majeur, si la séparation est insuffisante, l'entrechoquement pourrait causer des dommages structurels et non-structurels. Pour cela, les codes parasismiques spécifient un espace minimal.

Pour comprendre la disposition des codes sur l'effet de l'entrechoquement, deux bâtiments seront modélisés comme deux systèmes linéaires à un seul degré de liberté. On soumet ces bâtiments à un chargement sous forme d'une accélération à la base. La distance de séparation entre eux sera calculée suivant les formules de certains codes. Le résultat sera analysé pour faire une comparaison entre les formules des codes.

V.2 Revue sur les dispositions des codes

La plupart des règlements parasismiques ne prennent pas en compte le phénomène de l'entrechoquement. Parmi ceux qui le considèrent, ils ne prévoient pas des règles spécifiques qui doivent être suivies. Une liste des dispositions des codes sur l'entrechoquement est décrite dans l'annexe. Ces codes spécifient une distance de séparation minimale entre les bâtiments adjacents. Dans certains cas, cela dépend seulement des déplacements maximaux de chaque bâtiment (Canada) et dans d'autres cas, une petite valeur qui peut être soit un pourcentage de la précédente, soit une combinaison quadratique des déplacements maximaux (France). Dans d'autres cas, la distance de séparation est subordonnée à la hauteur du bâtiment (Taiwan) [9].

Selon le code international du bâtiment (IBC 2000) toutes les structures adjacentes doivent être séparées par une épaisseur suffisante entre elles. Si les bâtiments adjacents sont sur la même ligne de propriété, la distance minimale de séparation suit simplement la règle SRSS et s'ils ne sont pas situés sur la même ligne de propriété suit tout simplement la règle ABS. Le code du bâtiment uniforme (UBC 1997) suit également les mêmes dispositions. Le code (FEMA:273-1997) suit la règle SRSS. Le code (FEMA:273-1997) suit la règle SRSS avec une valeur qui ne doit pas dépasser 4% de la hauteur du bloc le moins élevé ($0.04h_2$). Le code (ASCE:7-2010) suit la règle SRSS. Les détails des dispositions des codes sont listés dans le tableau ci-dessous [30].

On observe alors que la plupart des codes suivent la règle SRSS. La distance de séparation minimale n'est pas uniquement en fonction de la réponse en déplacement de la structure, mais aussi de divers facteurs tels que le facteur d'importance, facteur d'amplification de la flexion et le coefficient de comportement.

Tableau 5.1 Détails sur les formules de calcul de la distance de séparation selon certains codes.

	Code	Formule
1	IBC 2000	$d = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \dots\dots$ (Bâtiments adjacents situés sur la même ligne de propriété) [Clause 1613.6.7] $u_i = \frac{C_d \delta_{xe}}{I} \dots\dots$ [Clause 1622.3.3]
2	UBC 1997	$d = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \dots\dots$ (Bâtiments adjacents situés sur la même ligne de propriété) [Clause 1633.2.11] $\Delta_M = 0.7R\Delta_s \dots\dots$ [Clause 1630.9.2]
3	ASCE:7-2010	$d = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \dots\dots$ (Bâtiments, ou unités structurellement indépendantes, qui appartenant à la même propriété) [Clause 12.12.3] $u_i = \frac{C_d \delta_{max}}{I_e} \dots\dots$ [Clause 15.5.2.1]

C_d : Facteur d'amplification de la flexion.

I : Facteur d'importance.

δ_{xe} : Déplacement maximum du aux forces sismiques.

R : Coefficient de comportement.

V.3 Distance de séparation minimale entre les bâtiments

Pour étudier l'effet de l'entrechoquement entre deux bâtiments adjacents, on a considéré deux bâtiments comme la montre la figure (5.1). Ces bâtiments ont été idéalisés comme deux systèmes linéaires d'un seul degré de liberté. Les deux bâtiments ont des masses $m_1 = 128kg$ et $m_2 = 72kg$, même rigidité $k = 507(KN / m)$ et même coefficient d'amortissement $\xi = 5\%$.

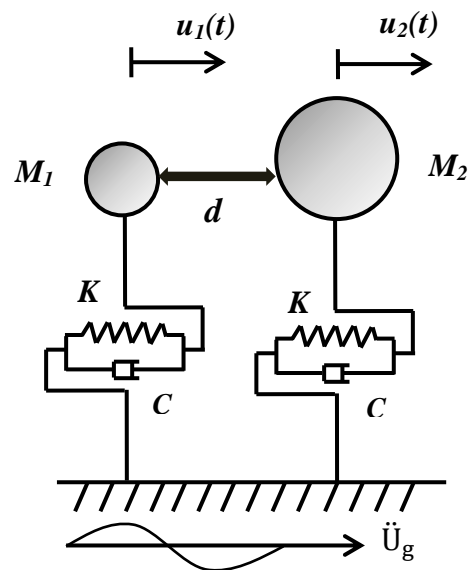


Fig. 5.1 Modèle idéalisé des deux systèmes à un seul degré de liberté.

$u_1(t)$ et $u_2(t)$: Sont les réponses indépendantes de la structure 1 et 2 respectivement. L'équation différentielle du mouvement du système (SDOF) s'exprime comme suit :

$$m_i \ddot{u}_i(t) + c_i \dot{u}_i(t) + k_i u_i(t) = -m_i \ddot{u}_g(t) \quad (5.1)$$

Afin d'étudier la collision entre les bâtiments, nous avons considéré la composante (N-S) du séisme d'El-Centro (1940). L'accélération maximale du sol (PGA) est de 0.318g. L'approche implicite par la méthode de l'accélération moyenne de Newmark est utilisée pour trouver la réponse des deux systèmes. L'entrechoquement se produit lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$u_1(t) - u_2(t) \geq d \quad (5.2)$$

Lorsque la condition ci-dessus est satisfaite, alors le contact se produit. Dans le but de trouver la distance de séparation entre deux bâtiments, nous avons fixé la période du bâtiment (1) à 0.1 (sec) et en variant les valeurs de la période pour le bâtiment(2), 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2, 0.225 et 0.25 (sec). Les détails sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau 5.2 Détails sur: Masses, rigidité et la distance de séparation entre deux bâtiments.

	Masse (Kg)	Rigidité (KN/m)	Période (sec)	Distance de séparation (cm)
1	72	507	0.075	5.1191e-003
2	128	507	0.1	0
3	198	507	0.125	5.8491e-003
4	288	507	0.15	0.011
5	388	507	0.175	0.014
6	513	507	0.2	0.017
7	641	507	0.225	0.018
8	802	507	0.25	0.019

Le maximum de la réponse relative des bâtiments adjacents donne la distance de séparation minimale entre eux, comme le montre la figure (5.2). D'après cette figure, on peut observer que, lorsque la période de la structure (2) augmente, la distance de séparation augmente. Par ailleurs, lorsque les deux structures ont la même période fondamentale, il est inutile de fournir n'importe quelle distance de séparation, parce que les bâtiments vont vibrer en phase et n'entre pas en collision à n'importe quel moment. Cependant, cette situation n'est pas réaliste, car il est très difficile de construire deux bâtiments avec la même période propre. Egalement, on peut observer sur la figure (5.2) que la distance de séparation minimale est presque constante lorsque la période de la structure (2) à une période au-delà de 1 sec. Pour étudier ce cas, l'analyse non-linéaire est nécessaire.

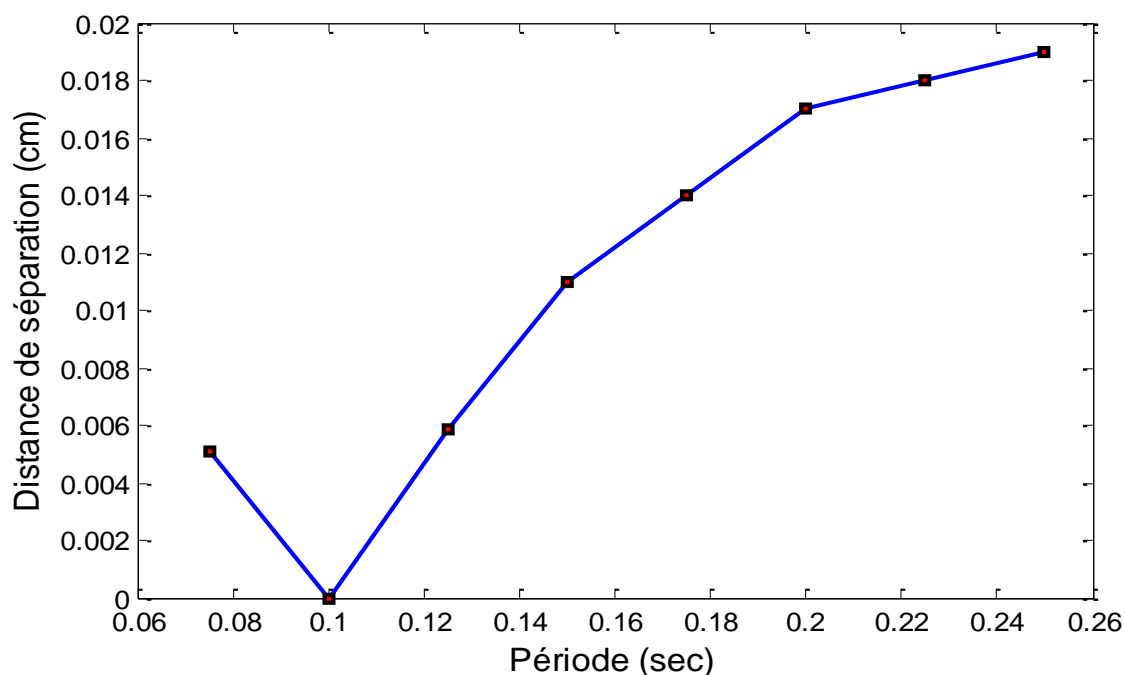


Fig. 5.2 Espace minimal entre deux structures ayant des propriétés dynamiques différentes.

Etant donné que la plupart des formules des codes reposent sur l'analyse linéaire, c'est la raison pour laquelle l'analyse linéaire est utilisée dans cette étude.

Le résultat de cette étude peut s'appliquer à un système à plusieurs degrés de liberté (*MDOF*) dont la réponse est gouvernée par son mode fondamental. Elle n'est pas applicable aux grands bâtiments, ayant des contributions des modes supérieures.

V.4 Résultats de l'étude

Pour fournir la distance de séparation entre les deux bâtiments, nous avons fixé la période du bâtiment (1) à 0.1 (sec) et on a varié les valeurs de la période pour le bâtiment (2) de 0.075, 0.1, 0.2 et 0.25 (sec). Egalement, afin de faire une analyse dynamique linéaire par accélérogramme, nous avons choisi la composante (N-S) de l'accélérogramme enregistré lors du séisme d'El-Centro (1940). L'accélération maximale du sol est de 0.318 (g) avec une durée de 31.18 (Sec).

Dans cette analyse, pour calculer la force de contact entre les deux systèmes, l'élément de contact linéaire est choisie (voir chapitre 1). La rigidité de l'élément de contact est supposé est égale à 603 (MN/m).

Tableau 5.3 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents ayant des périodes de temps T_1 , T_2 , selon certains codes (PGA= 0.318 (g)).

N	T_1 (sec)	0.1							
	T_2 (sec)	0.075		0.1		0.2		0.25	
	Code	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force
1	IBC 2000	0.016	0	0.017	0	0.02	0	0.024	0
2	UBC1997	0.027	0	0.029	0	0.033	0	0.042	0
3	ASCE 7-10	0.026	0	0.03	0	0.035	0	0.043	0

Tableau 5.4 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents soumis une accélération maximale PGA= 0.636(g).

N	T_1 (sec)	0.1							
	T_2 (sec)	0.075		0.1		0.2		0.25	
	Code	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force
1	IBC 2000	0.031	0	0.033	0	0.04	0	0.046	0
2	UBC1997	0.054	0	0.058	0	0.069	0	0.083	0
3	ASCE 7-10	0.055	0	0.059	0	0.071	0	0.085	0

Tableau 5.5 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents soumis une accélération maximale $PGA= 0.954(g)$.

N	T_1 (sec)	0.1							
	T_2 (sec)	0.075		0.1		0.2		0.25	
	Code	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force
1	IBC 2000	0.047	0	0.049	0	0.059	0	0.071	0
2	UBC1997	0.082	0	0.086	0	0.10	0	0.12	0
3	ASCE 7-10	0.084	0	0.088	0	0.10	0	0.013	0

Tableau 5.6 Distance de séparation entre deux bâtiments adjacents soumis une accélération maximale $PGA= 1.272(g)$.

N	T_1 (sec)	0.1							
	T_2 (sec)	0.075		0.1		0.2		0.25	
	Code	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force	d (cm)	Force
1	IBC 2000	0.063	0	0.065	0	0.079	0	0.095	0
2	UBC1997	0.1	0	0.11	0	0.13	0	0.16	0
3	ASCE 7-10	0.11	0	0.12	0	0.14	0	0.17	0

L'accélération maximale du sol de la composante (N-S) de l'accélérogramme d'El-Centro (1940) $PGA=0.318(g)$ est multiplié par des coefficients (2 à 4), afin de calculer la distance de séparation et la force de contact. Les résultats indiquent qu'aucune force de contact n'a été observée pour les différentes valeurs de PGA.

V.5 Conclusion

D'après les observations ci-dessus, les conclusions suivantes peuvent être tirées dans cette étude :

- Pour les structures ayant les mêmes périodes propres, il n'est pas nécessaire de fournir une distance de séparation, parce que les bâtiments vibrent en phase et n'entrent pas en collision à n'importe quel moment.
- Si la valeur de l'accélération maximale du sol (PGA) augmente, la distance de séparation entre les bâtiments adjacents doit augmenter.
- La distance de séparation ne dépend pas seulement à la réponse en déplacement, mais dépend aussi de plusieurs facteurs comme les propriétés des matériaux et la relation entre les périodes propres.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'entrechoquement entre les structures adjacentes est un phénomène généralement observé lors des séismes majeurs, qui peut se produire quand les structures adjacentes vibrent en hors phase. L'entrechoquement peut influencer sur la réponse globale des structures qui peut causer des dommages structuraux et architecturaux. Pour éviter ce phénomène, la manière la plus simple et efficace consiste à assurer une séparation suffisante entre les structures. Pour cela, un espace minimal est spécifié dans la plupart des codes parasismiques.

Dans cette étude, une modélisation mathématique des structures adjacentes a été illustrée et sa mise en œuvre par l'analyse dynamique non-linéaire est présentée, visant une investigation numérique de l'effet de l'entrechoquement sur la réponse globale des structures pour évaluer la distance de séparation entre les structures adjacentes. D'après cette analyse, on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'évaluation de la distance de séparation basée sur le déplacement dû aux forces sismiques ne peut être qu'un seul critère, mais elle dépend aussi aux caractéristiques de l'action sismique et la relation entre les périodes fondamentales des structures adjacentes.
- L'analyse de l'ampleur de la force de contact indique que l'augmentation de la distance de séparation résulte de la réduction de la force de contact, et montre également que l'endommagement dû à l'entrechoquement se trouve être moins critique pour les bâtiments adjacents ayant des caractéristiques dynamiques différentes.
- L'effet de l'accélération maximale du sol (PGA) a été étudié. Il a été montré que le nombre de contacts diminue globalement quand l'accélération maximale diminue. Il montre également que l'évolution de la distance de séparation en fonction du (PGA) n'est pas strictement croissante.
- L'évaluation de la distance de séparation par la règle ABS donne des résultats conservateurs et des fois, le conservatisme est excessif ce qui la rend difficile à mettre en œuvre (surtout quand deux structures ayant des caractéristiques dynamiques similaires). La méthode SRSS pourrait prédire la distance de séparation avec assez d'exactitude quand les structures adjacentes ont presque la même période propre, mais elle donne en général un résultat conservateur lorsque les périodes fondamentales sont

éloignées. Seulement la méthode DDC est capable de prendre en compte la différence de phase de vibration entre les structures adjacentes.

- La distance de séparation calculée selon les différentes formules des codes montre que lorsque les valeurs du PGA augmentent, la distance minimale entre les structures doit augmenter. Elle montre aussi que la distance de séparation minimale ne dépend pas seulement à la réponse en déplacement, mais dépend aussi de plusieurs facteurs comme les propriétés des matériaux et la relation entre les périodes propres.
- Pour les structures ayant les mêmes périodes propres, il n'est pas nécessaire de fournir aucune distance de séparation, parce que les structures vibrent en phase et n'entrent pas en collision à n'importe quel moment.

L'effet de l'entrechoquement entre les structures isolées à la base a été étudié. D'après les résultats obtenus, on peut conclure :

- La probabilité de l'entrechoquement entre les structures adjacentes sur les systèmes d'isolation sismique peut être plus faible que les structures encastrées. Puisque les deux structures tendent à glisser dans la même direction, gardant l'espace entre eux approximativement constant.
- La distance de séparation éventuelle entre deux structures sur les isolateurs sismiques peut atteindre des valeurs décimétriques. En raison, des déplacements importants des appuis parasismiques au cours du séisme.
- La performance des systèmes d'isolation sismique peut réduire de façon significative sous l'influence du phénomène de l'entrechoquement. Puisque les valeurs de la force de contact atteignent à des valeurs plus grandes que celles des structures conventionnelles. Par ailleurs, afin de réduire l'intensité de l'entrechoquement, il est recommandé d'incorporer des dissipateurs d'énergies qui réduisent le transfert de l'énergie par formation des boucles hystérésis.
- L'effet de l'accélération maximale du sol a été étudié. il a été montré que la variation du nombre de contacts en fonction des valeurs de la distance de séparation est presque similaire pour toutes les valeurs du (PGA). Il montre également que l'évolution de la distance de séparation en fonction des valeurs de (PGA) est strictement croissante.

PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS

Au terme de cette étude, il nous semble pertinent d'évoquer d'autres aspects qui méritent d'être considérés dans des études futures :

- La pertinence de l'interaction sol-structure sur la réponse des structures inélastiques est à inclure dans l'effet de l'entrechoquement, car il existe des preuves de la corrélation entre l'occurrence de l'entrechoquement et les conditions de la flexibilité du sol de fondation. Ceci aidera à évaluer le degré d'approximation inhérent nos études qui négligent les effets de la flexibilité du sol.
- Des études supplémentaires sont nécessaires, en particulier le comportement des structures dû à l'entrechoquement de torsion et l'entrechoquement de plancher-à-poteau. Ces modèles peuvent être plus dangereux. Cependant, ces modèles sont encore plus complexes que ceux étudiés dans notre travail.
- L'efficacité des dispositifs de réduction de l'entrechoquement tels que les amortisseurs et les amortisseurs additionnels entre les segments de la superstructure doivent être étudiés, particulièrement entre les structures isolées à la base.
- Plusieurs travaux de recherche sont nécessaires basées sur l'analyse statique non-linéaire (Pushover) pour évaluer la distance de séparation minimale entre les structures adjacentes, afin de produire des outils et règles performantes et souples pour les codes de dimensionnement.

ANNEXE

I. Dimensionnements et lois de comportements des appuis parasismiques

Niveaux	LRB (Lead Rubber Bearing)			
	Diamètre D (cm)	Hauteur H (cm)	Rigidité effective horizontale $K_{eff}(KN/m)$	Rigidité verticale $K_v(KN/m)$
SP3	30.00	30.00	372.66	1435517.65
SP6	45.00	47.20	532.96	4007486.8
SP8	50.00	55.20	455.62	4367505.5

II. Liste sur les dispositions de calcul de la distance de séparation selon certains codes

Pays	Formules sur le calcul de la distance de séparation
Canada	-Deux bâtiments adjacents doivent être séparés par un espace sismique égale à la somme de leurs déplacements maximaux obtenus par une analyse élastique. <i>[clause 4.1.9.2(6)]</i>
Egypte	-Chaque bâtiment séparé de son voisin doit avoir un espace minimal de la frontière de propriété, soit de 2 fois les déplacements calculés ou 0.002 fois sa hauteur selon la valeur la plus grande, et dans de nombreux cas, d'au moins 2,5 cm. -Bâtiments adjacents n'appartenant pas à la même propriété doivent être séparés d'au moins 02 fois la somme des déplacements maximaux ou 0.004 fois sa hauteur selon la valeur la plus grande, et dans de nombreux cas pas moins de 5.0 cm. <i>[clause 2.7.2]</i>
Mexique	-Quand vous utilisez la méthode d'analyse sismique simplifiée, la distance de séparation ne doit être inférieure à 5 cm, ni plus petite que la hauteur du bâtiment multipliée par 0.007, 0.009 et 0.012 selon les zones sismiques I, II et III respectivement. <i>[clause 211]</i>
Taiwan	-L'entrechoquement peut être considéré ne pas se produire, lorsque les bâtiments seront séparés par une distance supérieure ou égale à $0.6 \times 1.4 f_y R_\alpha$ fois le déplacement causé par l'effort tranchant à la base. <i>[clause 2.5.4]</i> * le coefficient 0.6 est utilisé en raison de la faible probabilité que deux bâtiments adjacents se déplacent dans directions opposés et atteignent le déplacement maximum simultanément.

Pays	Formules sur le calcul de la distance de séparation
Serbie	-La largeur minimale du joint sismique est de 3.0 cm.Elle est majoré de 1.0 cm pour chaque augmentation de 3.0 mètres au-dessus de 5.0 mètres de la hauteur du bâtiment. Dans le cas des bâtiments de plus de 15.0 mètres, ainsi que dans le cas des structures flexibles de moindre hauteur, il ne doit pas être inférieure à la somme des déplacements maximums des parties adjacentes du bâtiment, ni ne doit être inférieure à ce qui procède. <i>[clause 47]</i>
Maroc	- Il convient de séparer par des joints les bâtiments de hauteurs et de masses très différentes (écart supérieur à 15%). La largeur du joint entre deux structures ne doit pas être inférieure à la somme de leurs déformations latérales respectives incluant les déformations de torsion.A défaut de justification la largeur du joint entre deux blocs sera supérieure à $\alpha.H_2$; avec H_2 la hauteur du bloc le moins élevé, $\alpha = 0.003$ pour les structures en béton et $\alpha = 0.005$ pour les structures en acier.La largeur minimale entre joints ne doit pas être inférieure à 50 mm. <i>[clause 4.4]</i>
Grèce	-Pour les bâtiments qui sont en contact avec les uns des autres, la largeur du joint respectif, en l'absence d'une analyse plus précise peut être déterminée sur la base du nombre total d'étages en contact comme suit : 04 cm jusqu'à de 3 étages, 08 cm 4-8 étages, 10 cm pour plus de 8 étages. Pour les étages souterrains un joint sismique n'est pas nécessaire. <i>[clause 4.1.7.2]</i>

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] P.C. Polycarpou and P. Komodromos (2012) ‘‘ A methodology for an efficient three-dimensional (3D) numerical simulation of earthquake-induced pounding of buildings’’, the 15thWorld Conference on Earthquake Engineering.
- [2] Alireza M.Goltabar, R. Shamstabar Kami and A. Ebadi ‘‘ Study of Impact between Adjacent Structures during of Earthquake and their Effective Parameters’’, American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (3): 210-218, 2008.
- [3] Bechtoula H., Ousalem H. [2005] ‘‘the 21 May 2003 Zemmouri (Algeria) Earthquake: Damages and disaster responses, journal of advanced concrete technology, Vol.3, no. 1.
- [4] Davidovici, V. [2003]’’séisme de Boumerdes, 21 Mai 2003,’’ Rapport préliminaire, pp.154.
- [5] Rosenblueth, M., Meli, R. [1986], ‘‘the 1985 earthquakes: causes and effects in Mexico City’’, Concrete International 8, American concrete institute,
- [6] Li xin, wang. (2007),’’Seismic vulnerability and pounding hazard of asymmetric building with transfer system: Experimental and analytical modeling’’, A thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, the Hong Kong Polytechnic University.
- [7] N Bourahla, F Kahlouche. [2013] ‘‘ Réduction du risque d’entrechoquement des bâtiments existants adjacents par synchronisation et systèmes d’amortissement hystérésis, Association française du Génie parasismique (AFPS).
- [8] Davidovici V. (1999), La construction en zone sismique, Le moniteur.
- [9] Chenna Rajaram, ‘‘ A study of pounding between adjacent structures’’, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Earthquake Engineering Research Centre, International Institute of Information Technology, Hyderabad-500 032 April 2011
- [10] RPA99/V2003 (2003), Règles Parasismiques Algériennes, DTR BC248; Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, CGS, Algeria

[11] (Eurocode 8) ‘‘Design of structures for earthquake resistance’’, European Standard ENV 1998-1-2:1994 Technical Committee CEN/TC 250, 1994

[12] UBC (1997) ‘‘Uniform building code’’.

[13] IBC (2000) ‘‘the International Building Code’’,

[14] (Federal Emergency Management Agency (1997), ‘‘NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings’’, FEMA-273, Washington, D.C.

[15] Lopez Garcia, D., ‘‘Separation between adjacent nonlinear structures for prevention of seismic pounding’’, Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004, Paper No. 478.

[16] Bipin Shrestha, ‘‘Effects of separation distance and nonlinearity on pounding response of adjacent structures’’, International Journal of Civil Structural Engineering, volume 3, N°3, 2013

[17] Shehata E Abdel Raheem (2006) ‘‘Seismic Pounding between Adjacent Building Structures’’, Electronic Journal of Structural Engineering, 6 (2006)

[18] R.E. Valles-Mattox and A.M.Reinhorn (1996) ‘‘An energy approach to pounding of structures’’, eleventh world conference on earthquake engineering

[19] M. Papadrakakis, C. A postolopoulou, A. Zacharopoulos, and S. Bitzarakis ‘‘Three-Dimensional Simulation of structural Pounding During Earthquake’’, Journal of Engineering Mechanics, May (1996, 423.

[20] Susendar Muthukumar¹ and Reginald DesRoches² ‘‘A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation’’, Earthquake Engineering and Structural dynamics, 2006; 35:811–828

[21] Maison BF, Kasai K ‘‘Dynamics of pounding when two buildings collide’’, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1992; 21:771–786.

[22] Anagnostopoulos SA. ‘‘Pounding of buildings in series during earthquakes’’, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1988; 16:443–456.

- [23] Armin Masroor and Gilberto Mosueda “Seismic Response of Base Isolated Buildings Considering Pounding to Moat Walls”, Technical Report MCEER-13-0003 February 26, 2013
- [24] ADJOU Naima. [2012]’’Investigation Numérique Sur Les Systèmes D’isolation Sismique Des Structures Contreventées Par Portiques Autostables En Béton Armé’’, Thèse de magister, Université Des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.
- [25] Ministre des travaux publics et services gouvernementaux, (2001), « Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d’atténuation des risques pour les immeubles canadiens », N° du catalogue : D82-73/2002F-IN, Gouvernement du Canada.
- [26] Panayiotis C. Polycarpou, Petros Komodromos “ Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures”, Engineering Structures 32 (2010) 1937–1951.
- [27] V.K. Agarwala, J.M. Niedzweckia, J.W. van de Lindtb “ Earthquake induced pounding in friction varying base isolated buildings”, Engineering Structures (2007).
- [28] Miloud HEMSAS. [2010] “ Modélisation par macro-éléments du comportement non-linéaire des ouvrages à voiles porteurs en béton armé sous action sismique’’, Thèse pour obtenir le grade de Docteur, Université Bordeaux.
- [29] Pierre-Alain NAZÉ. [2004] “ Contribution à la prédiction du dommage des structures en béton armé sous sollicitations sismiques’’, Thèse pour obtenir le grade de Docteur, École Centrale de Lyon.
- [30] Rajaram Chenna, Pradeep Kumar Ramancharla [2012] “ Study on Impact between Adjacent Buildings: Comparison of Codal Provisions’’, 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)