

N° D'ORDRE : D-LMD...../2017

THESE

Présentée pour obtenir

LE DIPLOME DE DOCTORAT LMD
SPECIALITE : GENIE CIVIL
OPTION : STRUCTURES

Par

HADJADJ Asma

**ESSAI D'ANALYSE DES FACTEURS CONTRIBUANT A
L'EXCENTRICITE ACCIDENTELLE**

Soutenue le 29 juin 2017 devant le jury composé de :

Présidente: Laredj Nadia Maître de conférences Univ. de Mostaganem

Examineurs: Kassoul Amar Professeur Univ. de Chlef

Branci Taieb Professeur Univ. de Chlef

Rapporteur: Benanane Abdelkader Professeur Univ. de Mostaganem

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

RESUME

Dans cette thèse, l'influence de la composante sismique de torsion par rapport à celles de translation sur la réponse structurale est étudiée, d'une part. Et d'autre part, sa contribution dans l'excentricité accidentelle, préconisée par les règlements parasismiques en vigueur, est estimée. Pour ce faire, une analyse elasto-plastique pour deux types de structure, régulière et irrégulière, est effectuée et des accélérogrammes de rotation ont été construits à partir de ceux de translation. Les résultats trouvés montrent clairement l'effet non négligeable de la composante sismique de rotation sur la réponse structurale, notamment pour celle irrégulière. Par ailleurs, l'excentricité accidentelle, recommandé par plusieurs codes parasismiques existants, de 5% de la dimension du plancher perpendiculaire au séisme est largement dépassée.

Mots clés : *Excentricité accidentelle, torsion accidentelle, composante sismique de rotation, couple de torsion, analyse dynamique non-linéaire*

ABSTRACT

This research addresses the influence of the seismic component of rotation on the torsional response of building structures subjected to earthquake ground motions. Furthermore, the increase in equivalent additional eccentricity due to the action of this component is estimated. For this purpose, a rotational acceleration component is generated from the translational ones and applied to both symmetric and asymmetric structures using nonlinear dynamic analysis. The obtained results show clearly the considerable effect of the torsional seismic component on the structural response. The estimated eccentricity of the studied cases exceeded the value recommended by several seismic codes as an accidental eccentricity.

Key words: *Accidental eccentricity, accidental torsion, seismic rotational component, torsional coupling, nonlinear dynamic analysis.*

الخلاصة

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير المركبة الزلزالية الدورانية على الاستجابة الإلتوائية للإنشاءات المعرضة للحركة الزلزالية. و في هذا الصدد تم تخمين الانحراف الإضافي المكافئ لهذا التأثير. لهذا الغرض، أنشأت مخططات التسارع الزلزالي الدوراني مستخرجين من مركبات أفقية تسجيلية لزلزال حقيقية وتم تطبيقها على كل من المنشآت المنتظمة وغير المنتظمة باستخدام التحليل الديناميكي اللاخطي. وقد أظهرت بوضوح النتائج التي تم الحصول عليها مدى أهمية التأثير المذكور أعلاه وخاصة على المنشآت الغير منتظمة. أما الانحراف الإضافي المعادل المقدر للحالات التي تمت دراستها فقد تجاوز قيمة 5% من بعد المبنى وعمودي على الاتجاه الذي يجري أخذه بعين الاعتبار والتي أوصت بها عدة مدونات زلزالية باعتبارها الانحراف غير المقصود.

كلمات المفاتيح

الانحراف غير المقصود، الإلتواء غير المقصود، المركبة الزلزالية الدورانية، التحليل الديناميكي اللاخطي

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	9
TABLE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	12
INTRODUCTION GENERALE.....	13
Position du problème.....	14
Objectifs	16
Organisation de la thèse	17
CHAPITRE I.....	19
DEFINITION ET PRATIQUE DE L'EXCENTRICITE ACCIDENTELLE	19
Introduction	20
I.1. Notion ambiguë du centre des rigidités	Erreur ! Signet non défini.
I.1.2. Centre de rigidité : centre des raideurs ou de cisaillement ou de torsion ?.....	20
I.1.3. Peut-on évaluer les centres de rigidité dans les bâtiments à plusieurs étages ?.....	21
I.1.4. Les diverses définitions du centre de rigidité donnent-elles les mêmes résultats ?	24
I.2. Analyse des effets de la torsion accidentelle	27
I.2.1. Excentricité accidentelle	27
I.2.2. Estimation des effets de l'excentricité accidentelle par l'analyse statique linéaire .	28
I.2.3. Cas de calcul dynamique tridimensionnel	33
I.2.4 Combinaison des effets de l'excentricité accidentelle dus aux deux composantes horizontales du séisme dans le cas de l'analyse linéaire.....	34
I.2.5. Estimation simplifiée des effets de l'excentricité accidentelle dans l'Eurocode 8 .	36
I.2.6. L'excentricité accidentelle dans l'analyse non linéaire	38
Conclusion	39
CHAPITRE II.....	39
L'EXCENTRICITE ACCIDENTELLE ET LE CALCUL DYNAMIQUE	39
II.1 Approches analytiques pour le déplacement du centre des masses dans l'analyse modale	40
II.2. Approche détaillée	42
II.2.1. Construction de la matrice de masse des structures asymétriques	42
II.3. Approche simplifiée	47

II.3.1. Rappel théorique de l'analyse en base modale	48
II.3.2. Prise en compte de la torsion accidentelle dans l'analyse modale	50
II.3.3. Comparaison des deux approches détaillée et simplifiée	51
II.3.4. Avantages et inconvénients des deux approches	56
 CHAPITRE III	57
ESTIMATION DE LA COMPOSANTE SISMIQUE DE ROTATION D'AXE VERTICAL	57
 III.1 Introduction	58
III.2. Causes et caractéristiques du mouvement sismique de rotation.....	59
III.3. Mesure du mouvement sismique de rotation d'axe vertical.....	63
III.3.1. Sismomètres rotatifs pour la mesure indirecte de rotation	63
III.2. Sismomètres rotatifs pour la mesure directe de la rotation	66
III.4. Détermination analytique du mouvement sismique de torsion	67
III.4.1. Première Méthode	67
III.4.2. Deuxième Méthode : Méthode Lee et Trifunac	71
 CHAPITRE IV	76
EFFETS DE LA ROTATION SISMIQUE D'AXE VERTICAL SUR LA REPONSE STRUCTURALE NON-LINEAIRE.....	76
 IV.1. Modélisation des structures types analysées	77
IV.2. Caractéristiques des composantes sismiques utilisées.....	80
IV.2.1. Distance épacentrale.....	80
IV.2.2. Contenu fréquentiel	80
IV.3. Génération de l'accélération angulaire de la composante de torsion	82
IV.4. Contribution de la composante sismique de torsion dans la réponse structurale	87
 CHAPITRE V	90
EFFET DE LA TORSION SISMIQUE INDUITE TRIBUTAIRES DES PROPRIETES DYNAMIQUES STRUCTURALES	90
 V.1. Introduction.....	91
V.2. Caractéristiques des séismes utilisés.....	91
V.3. Description des structures étudiées	93
V.4. Etude paramétrique	95
 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES.....	100

REFERENCES	103
ANNEXES	106
Annexe A : Programme d'implémentation des accélérogrammes de torsion et de modélisation dans le code Ansys	107
Annexe B : Feuille de calcul des accélérogrammes de torsion selon la méthode de Lee & Trifunac	118
Annexe C : Feuille de calcul des accélérogrammes de torsion en fonction de l'angle d'incidence	119

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la santé pour mener à terme cette thèse.

Le présent travail n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de certaines personnes. Et je ne suis pas non plus capable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont pu jouer à mes côtés pour en arriver là. Cependant, je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Mes premiers remerciements vont d'abord à mon directeur de thèse, le professeur BENANANE Abdelkader, pour sa patience et sa confiance. Je lui suis reconnaissante pour ses encouragements et ses précieux conseils. Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements ne seront pas complets sans ceux adressés à tous les miens, qui se reconnaîtront, pour leur soutien permanent, leur confiance et leurs encouragements.

TABLE DES FIGURES

Figure I.1a. Système de forces sismiques F_{xi} suivant la direction X	24
Figure I.1b. Système de forces sismiques F_{yi} suivant la direction Y	24
Figure I.1c. Système de moments M_{zi} d'axe vertical Z	24
Figure I.2. Caractéristiques géométriques de la structure autostable étudiée	25
Figure I.3. Caractéristiques géométriques de la structure contreventée étudiée	25
Figure I.4a. Localisation des CR par les deux approches (structure en portiques).....	25
Figure I.4b. Localisation des CR par les deux approches (structure contreventée par des voiles).....	26
Figure I.5a. Caractéristiques géométriques de la structure contreventée étudiée	26
Figure I.5b. Système de forces F_{xi} suivant la direction X.....	26
Figure I.6. Principe du décalage de la masse	28
Figure I.7. Point d'application des forces statiques équivalentes	31
Figure I.8. Différents déplacements imposés par les règles PS92	34
Figure I.9. Configuration en plan de la structure étudiée.....	35
Figure I.10. Effets de la torsion accidentelle en termes de déplacements normalisés dans les deux directions de calcul.....	35
Figure I.11. Définition de L_e et X.....	37
Figure II.1. Méthodologie de prise en compte de l'excentricité accidentelle pour un calcul dynamique tridimensionnel	41
Figure II.2. Création d'une excentricité dans une structure à un seul niveau	43
Figure II.3. Principe de modélisation d'un diaphragme rigide.....	44
Figure II.4. Relation entre les nœuds maître et esclaves dans une approximation d'un diaphragme rigide.....	44
Figure II.5. La prise en compte de la torsion accidentelle dans la méthode simplifiée.....	51
Figure II.6. Vue en plan de la structure type étudiée.....	52
Figure II.7. Modélisation en trois dimensions du premier bâtiment étudié.....	53
Figure II.8. Modélisation en trois dimensions du premier bâtiment étudié.....	53
Figure II.9. Modélisation en trois dimensions du premier bâtiment étudié.....	54
Figure III.1. Effets sismiques sur une structure.....	58
Figure III.1'. Rotation d'objets due à la composante sismique de torsion.....	59
Figure III.2. Propagation des ondes de volume dans le plan principal (incidentes et réfléchies).....	59
Figure III.2'. Ondes de volume.....	60
Figure III.3. Ondes de surface.....	61
Figure III.4. Mouvements élémentaires d'une structure sous l'action sismique.....	63
Figure III.5. Principe de mesure indirecte par des sismomètres rotatifs	64
Figure III.6. Sismomètre rotatif, description du modèle TAPS.....	64
Figure III.7. Sismomètre rotatif, modèle TAPS	64
Figure III.8. Sismomètre rotatif, description du modèle Rotaphone 3D.....	65
Figure III.9. Sismomètre rotatif, Rotaphone 3D.....	65
Figure III.10. Sismomètre rotatif, description du modèle Rotaphone 6D.....	65
Figure III.11. Sismomètre rotatif, Rotaphone 6D.....	65
Figure III.12. Sismomètre rotatif, description du modèle Rotaphone D.....	66
Figure III.13. Sismomètre rotatif, modèle Rotaphone D.....	66
Figure III.14. Sismomètre rotatif, en anneau laser installé horizontalement.....	66
Figure III.15. Sismomètre rotatif, gyroscope en fibre optique	66
Figure III.16. Directions de propagation des ondes sismiques.....	69

Figure III.17. Interprétation géométrique des formules aux différences	71
Figure III.18. Propagation d'une onde S incidente.....	72
Figure III.19. Détail de propagation des ondes à partir de l'hypocentre vers la station d'enregistrement dans le plan principal et réflexion des ondes incidentes à partir de la surface libre.....	72
Figure III.20. Le ratio $\frac{\omega}{2C_x}$ de l'onde de Love en fonction de la fréquence	74
Figure IV.1. Configuration en 3D de la structure régulière étudiée.	77
Figure IV.2. Configuration en 3D de la structure irrégulière étudiée.....	77
Figure IV.3. Coupe transversale d'une poutre type en béton armé.	77
Figure IV.4. Coupe transversale d'un poteau type en béton armé.....	77
Figure IV.5. Section transversale de l'élément barre en 3D.....	78
Figure IV.6. Lois de comportement béton utilisées.....	79
Figure IV.7. Loi de comportement acier utilisée	79
Figure IV.8. Comparaison de loi de comportement contrainte-déformation du modèle utilisé et celle du moment-courbure d'un logiciel commercial.....	79
Figure IV.9. Accélérogrammes de translation et de torsion du séisme de Vrancea.....	83
Figure IV.10. Accélérogrammes de translation et de torsion du séisme de Petrolia.....	84
Figure IV.11. Accélérogrammes de translation et de torsion du séisme de Christchurch	85
Figure IV.12. Spectre de puissance des accélérations de translation et de torsion du séisme de Vrancea.....	85
Figure IV.13. Spectre de puissance des accélérations de translation et de torsion du séisme de Petrolia	86
Figure IV.14. Spectre de puissance des accélérations de translation et de torsion du séisme de Christchurch	87
Figure IV.15. Augmentation du déplacement due à la composante sismique de torsion, pour la structure régulière.....	88
Figure IV.16. Augmentation du déplacement due à l'excentricité accidentelle ajoutée pour la structure régulière.....	88
Figure IV.17. Augmentation du déplacement due à la composante sismique de torsion, pour la structure irrégulière	89
Figure IV.18. Augmentation du déplacement due à l'excentricité accidentelle ajoutée, pour la structure irrégulière	89
Figure V.1. Accélérogrammes de torsion calculés des séismes sélectionnés.....	92
Figure V.2. Spectres de Fourier des accélérogrammes de torsion.	93
Figure V.3. Configuration en plan type des structures.....	92
Figure V.4. Elévation type et nœud sélectionné pour l'analyse de la réponse structurale.....	93
Figure V.5. Effet du ratio fréquentiel sur le déplacement normalisé.	98
Figure V.6. Dépendance du déplacement normalisé des conditions des sites.....	99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Coefficients de prise en compte de l'excentricité dans les codes parasismiques	29
Tableau II.1. Dimensions des éléments de structure du bâtiment étudié.....	52
Tableau II.2. Comparaison déplacements maximaux	54
Tableau II.3. Comparaison Efforts tranchants maximaux (direction X)	55
Tableau II.4. Comparaison Efforts tranchants maximaux (direction Y)	55
Tableau IV.1. Caractéristiques des séismes sélectionnés	82
Tableau V.1. Caractéristiques des séismes sélectionnés	91
Tableau V.2. Description des dimensions et charges des sept modèles de structures étudiées	94
Tableau V.3. Fréquences, ratios fréquentiels et pourcentage des masses effectives	96

INTRODUCTION GENERALE

Position du problème

Les bâtiments dont le système de contreventement est fortement dissymétrique sont sollicités par des mouvements de torsion naturelle autour d'axe vertical. Cette torsion est due aux excentricités existant entre les centres de masses et les centres de torsion aux différents niveaux. Outre l'influence de la dissymétrie, l'effet de torsion peut être, dans certains cas, attribué à des causes accidentelles non prévues comme la variabilité spatiale des charges permanentes ou une distribution défavorable des charges d'exploitation et également aux déphasages des mouvements du sol sous la fondation.

Dans l'analyse sismique des structures, la torsion accidentelle est un facteur additionnel qui devrait être considéré pour assurer un minimum de résistance et de rigidité à la torsion et limiter les conséquences de la réponse de torsion imprévue. L'excentricité accidentelle est incluse dans beaucoup de codes parasismiques pour essayer de pallier ce problème ; pour ce faire, ces derniers stipulent de décaler le centre de masse de part et d'autre de sa position nominale d'une distance de 5% ou 10% de la dimension du plancher perpendiculaire à l'action sismique. Ceci conduit à quatre situations différentes pour les deux directions sismiques. Le but est d'estimer les effets maximaux de cette torsion accidentelle.

De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à l'étude des effets de la torsion dans les structures nominalelement symétriques et asymétriques, notamment l'estimation de l'excentricité accidentelle et l'évaluation des dispositions des codes parasismiques en la matière (Tso et Dempsey, 1980). Ainsi, on estime que les effets de la torsion accidentelle ne peuvent pas être décrits correctement en appliquant, de façon statique, des moments de torsion équivalents (Dimova et Alashki 2003). De surcroît, des études analytiques, pour des structures d'un seul niveau, ont montré la dépendance de l'excentricité accidentelle et des propriétés dynamiques structurales, à l'instar du rapport entre la fréquence de torsion et celles de translation (Enache, 2010). Par ailleurs, Il convient de préciser que la plupart des recherches concernant l'efficacité de l'excentricité accidentelle réglementaire (recommandée par les codes modernes) se basent soit sur des modèles élastiques ou simplifiés. La validité, toutefois, des conclusions fondées sur des modèles simplifiés, d'un seul niveau (trois degrés de liberté) et transposées aux modèles à plusieurs niveaux (plusieurs degrés de liberté) est questionnable

(Myslimaj et Tso, 2002, Tso et Myslimaj, 2003, Stathopoulos et Anagnostopoulos 2003, Stathopoulos et Anagnostopoulos, 2005).

En ce qui concerne le cas des oscillations dues aux mouvements différentiels horizontaux du sol, la torsion est normalement prise en compte, dans les calculs, par l'introduction de la composante de rotation d'axe vertical du séisme. Malheureusement les enregistrements de ladite composante font défauts, les appareils de mesures conventionnels ne le permettent pas. Pour pallier à cette difficulté, tous les codes parasismiques exigent de prendre en compte celle-ci sous forme d'excentricité additionnelle de manière approchée. Car les causes de l'excentricité accidentelle étant, de par leur nature, difficilement quantifiables.

S'agissant de l'enregistrement direct du mouvement sismique de rotation (basculement et torsion), il demeure encore un domaine de recherche (Basu et al. 2012, Suryanto et al. 2006). La fabrication d'instruments d'enregistrement pour un usage généralisé et normalisé est en gestation : durant la décennie passée, des mouvements sismiques de rotation ont été enregistrés avec succès dans plusieurs pays, en utilisant des appareils très sophistiqués : sondes de rotation sensibles, gyroscopes au laser hautement sensibles (Takeo, 1998; McLeod et al., 1998; Suryanto et al., 2006; Cochard et al., 2006). À court terme, on devra se contenter d'extraire les accélérogrammes de rotation à partir de ceux de translation enregistrés, pour étudier leurs effets sur la réponse structurale.

A ce sujet, on note, dans la littérature spécialisée, beaucoup d'efforts qui sont déployés par les chercheurs pour estimer le mouvement sismique de rotation ainsi que ses effets sur les structures. Des expertises post-sismiques ont souligné dans plusieurs cas des dommages structuraux dus à la torsion Mexico(1985),Loma Prieta(1989),Killari(1993) and Bhuj (2001).

En 1969, Newmark, en pionnier, a mis en lumière les effets de la torsion dans les bâtiments symétriques, dus aux mouvements sismiques de rotation. Pour ce faire, il a mis en relation, par une simple formulation mathématique, les composantes sismiques de rotation et de translation [Newmark, 1969]. D'autres chercheurs, dans le sillage de Newmark, ont estimé l'excitation sismique de torsion et souligné son influence sur la réponse structurale. Bielak(1978), Abdel Gaffar & Rubin(1984),Gupta and Trifunac(1989), Goel & Chopra (1994), Takeo (1998) Awad & Humar (1984) Ainsi, l'extraction des accélérogrammes ou spectres de

rotation se fait à partir de ceux de translation enregistrés, en utilisant la théorie élastique de la propagation des ondes planes. A cet égard, on note l'existence de deux procédures :

- La première se base sur l'hypothèse de l'existence d'une onde principale plane et une vitesse de propagation constante, en utilisant les enregistrements sismiques d'une seule station (Penzien et Watabe, 1975, Trifunac, 1982, Sun et Chen, 1998). Contrairement à leurs prédécesseurs, Li, Sun et Wang ont développé une méthode qui prend en compte la dépendance de la vitesse de propagation et de l'angle d'incidence des ondes et de leur fréquence (2002).

- La deuxième, plus précise, caractérisant la variation spatiale du mouvement sismique, repose sur la méthode géodique, en anglais geodetic method (Spudich et al., 1995), qui peut estimer le mouvement sismique de rotation, en utilisant les enregistrements de plusieurs stations judicieusement disposées (Basu, 2012, Ghayamghamian et Nouri 2009).

La plupart des recherches, ayant analysé l'influence du mouvement sismique de torsion sur la réponse structurale et l'évaluation de sa part dans l'excentricité accidentelle, sont basées sur l'analyse de bâtiments d'un seul niveau (Ghayamghamian et al., 2009, Enache 2010). Rares sont les études dédiées à des bâtiments avec plusieurs niveaux. De La Llera et Chopra (De La Llera et Chopra, 1994) ont utilisé un accélérogramme de torsion déterminé à partir des accélérations de translation enregistrées par des accéléromètres installés dans le bâtiment. Ils ont conclu que le coefficient de l'excentricité accidentelle recommandé par les codes parasismiques (égal à 5% de la dimension du plancher perpendiculaire à la direction sismique) est satisfaisant pour la majorité des structures. En revanche, ce coefficient est douze fois plus grand pour les structures rigides ayant des périodes inférieures à 0,3s. Chao He and Qifeng ont étudié l'impact de l'excitation sismique de rotation sur plusieurs types de bâtiments de grandes hauteurs. Leurs résultats montrent que la torsion, dans les bâtiments symétriques, provoquée par les composantes sismiques de rotation est beaucoup plus grande que celle provoquée par les composantes de translation. De plus, cette recherche indique que les effets des composantes sismiques de rotation dépendent de la hauteur des structures (Chao He and Qifeng Luo 2013).

Objectifs

Les spécificités de l'excentricité accidentelle, aléatoire et non quantifiable, doivent être prises en compte dans une méthodologie qui viserait à prospecter ses effets et l'efficacité des dispositions réglementaires en la matière. De cette problématique générale, les points suivants émergent :

- Les conservatismes induits par la prise en compte réglementaire de l'excentricité accidentelle, sous la forme d'un moment de torsion additionnel de façon statique, doivent être explorés à l'aide d'une analyse plus fine qui se rapprocherait de la réalité. En d'autres termes, il s'agit de faire une analyse temporelle non linéaire sous des actions sismiques de translation et de rotation, afin de cerner, d'une part, l'influence de la composante sismique de torsion par rapport à celles de translation, et d'estimer, d'autre part, sa contribution dans l'excentricité accidentelle.
- La non disponibilité des accélérogrammes de rotation et la non prise en compte de ces derniers par les codes de calculs commerciaux constituent une contrainte forte pour le choix de l'outil d'estimation de l'excentricité accidentelle. Ainsi la construction des accélérogrammes de rotation à partir de ceux de translation et leur implémentation dans un code de calculs est indispensable.

Organisation de la thèse

Ces points requièrent un examen attentif et fournissent une ossature à la méthodologie employée dans ce travail.

- Dans le chapitre I, la définition et la pratique de l'excentricité accidentelle sont analysées. Il s'agit de comprendre le phénomène et d'exposer de quelle manière les règlements parasismiques intègrent la torsion dans les méthodes de calcul et d'énumérer les différents types de représentations simplifiées.
- Dans le chapitre II on s'attelle sur les approches d'introduction de l'excentricité accidentelle dans le calcul dynamique. Car si la plupart des codes parasismiques existants préconise la prise en compte de l'excentricité accidentelle, en déplaçant le

centre de masse de sa position nominale d'une certaine distance, aucun ne donne la procédure à suivre pour effectuer ce décalage.

- Quant au chapitre III, il est dédié à l'estimation de la composante sismique de rotation d'axe vertical et la construction numérique de son accélérogramme.
- Le chapitre IV est consacré à l'analyse d'effet du mouvement de la rotation sismique d'axe vertical sur la réponse structurale non-linéaire. Autrement dit, il s'agit d'estimer l'ordre de grandeur de la torsion accidentelle due à la composante sismique de torsion.
- Enfin, le dernier chapitre V met en lumière que l'effet de la torsion sismique induite sont tributaires des propriétés dynamiques structurales.

CHAPITRE I

DEFINITION ET PRATIQUE DE L'EXCENTRICITE ACCIDENTELLE

Introduction

Ce chapitre s'attelle sur la pratique de l'excentricité accidentelle. Il s'agit de comprendre le phénomène et d'exposer de quelle manière les règlements parasismiques intègrent la torsion dans les méthodes de calcul et d'énumérer les différents types de représentations simplifiées.

I.1. Notion ambiguë du centre des rigidités

Les retours d'expériences post-sismiques montrent clairement que les bâtiments à structure régulière et symétrique se comportent mieux que ceux dont les formes géométriques et la distribution des éléments résistants sont complexes, même lorsque les règlements parasismiques ont été correctement appliqués. En effet, les structures irrégulières ont des éléments structuraux dont les réponses sismiques et les capacités de déformation sont très différentes ; ainsi, de telles structures sont très sensibles aux effets de torsion.

Le manque de symétrie dans le plan est souvent mesuré en termes d'excentricité statique entre le centre de gravité des masses d'un étage (CM) et le centre de rigidité (CR). A cet égard, un manque de clarté vis-à-vis la définition de cette excentricité est palpable dans la plupart des codes parasismiques en vigueur, notamment les Règles parasismiques Algériennes (RPA). Et pour cause, la plupart desdits codes ne dispose pas d'une formule claire pour évaluer le CR, notamment pour les structures à plusieurs niveaux. Ceci n'est pas étonnant car on retrouve plusieurs définitions dans la littérature qui ne donnent pas forcément les mêmes résultats pour les structures multiétagées. Pour ce faire, nous passerons en revue l'essentielle des définitions du CR existantes dans la littérature (I.1.2). Ensuite, on s'attelle sur les hypothèses et les conditions d'application de chacune d'elles, notamment pour les bâtiments irréguliers à plusieurs niveaux (I.1.3). Enfin, une comparaison numérique de deux approches différentes d'évaluation du CR est effectuée, pour mieux percevoir l'ampleur des écarts de leurs résultats (I.4).

I.1.2. Centre de rigidité : centre des raideurs ou de cisaillement ou de torsion ?

Le centre de rigidité est défini comme le centre de rigidité latérale de tous les éléments sismiques primaires. Dans les bâtiments à un seul étage, la détermination de celui-ci ne pose aucun problème. En effet, dans ce genre de structures, le CR, défini comme un point d'un

plancher rigide à travers lequel une force latérale ne provoque qu'une translation sans rotation, peut être localisé de façon précise (Hejal et Chopra, 1987). De plus, le CR coïncide, en l'occurrence, avec :

- Le centre de cisaillement (CC), point par lequel passe la résultante de l'effort tranchant au niveau de l'étage et ne causant qu'une translation seule du plancher rigide.
- Le centre de torsion (CT), point d'un plancher rigide restant immobile lorsque la structure est soumise à un moment de torsion d'axe vertical. En d'autres termes, dans les structures à un seul niveau, tous ces centres sont localisés sur un même point.

En revanche, Dans les bâtiments comportant plusieurs étages, l'évaluation du CR devient complexe, notamment pour les structures irrégulières, à cause du couplage inter-étages. Ainsi, les CR dépendent, en plus des raideurs latérales, de la distribution des forces sismiques, au niveau de chaque étage, dans les éléments de résistance. D'une manière générale, les centres de rigidités, des raideurs, de cisaillement, et de torsion sont des points différents. Seules des définitions approximatives du centre de rigidité sont alors possibles.

De nombreuses recherches (Hejal et Chopra, 1987, Smith et Vezina, 1985) ont identifiées une classe de structures dans lesquelles les CR sont indépendants des forces latérales et sont situés sur une même ligne verticale. Lesdites structures sont connues sous le nom « proportional buildings ». Il s'agit en fait de structures dont les matrices des rigidités latérales des différents éléments de résistance sont proportionnelles. Autrement dit, les déformations des éléments individuels de contreventement soumis à des charges horizontales ne sont pas très différentes, comme les systèmes de portiques spatiaux ou de voiles seuls. En revanche, ce n'est pas le cas des systèmes à contreventement mixte (portiques et voiles ensemble).

Ainsi, dans le cas des portiques et des systèmes de murs élancés dominés par les déformations de flexion, les positions des centres de rigidités peuvent être calculés à tous les niveaux comme centres de raideurs des éléments verticaux.

I.1.3. Peut-on évaluer les centres de rigidité dans les bâtiments à plusieurs étages ?

Contrairement aux structures à un seul niveau, l'évaluation des centres de rigidité dans celles à plusieurs niveaux pose problème. Car si certaines définitions du CR donnent des

formules simples, d'autres proposent des approches non pratiques pour l'ingénieur en structures, voire pas de formules du tout.

Nous rappelons ci-après les principales approches existantes dans la littérature et recommandés par quelques codes parasismiques, notamment l'Eurocode 8 :

- L'approche mentionnant que le CR, ne dépendant pas des forces latérales, est le centre des raideurs latérales : il s'agit de calculer le centre de gravité des raideurs au niveau de chaque étage. Ainsi, les CR sont fonctions uniquement des caractéristiques géométriques et mécaniques du bâtiment. Ainsi, il se situe sur une même ligne verticale. Cette définition n'est valable que pour les structures ayant le même type d'éléments de résistance (portique ou voiles) sur toute la hauteur. Les coordonnées du centre de rigidité sont calculées d'après les formules :

$$X_{CR} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{xi} x_i}{\sum_{i=1}^n k_{xi}} \quad (I.1)$$

$$Y_{CR} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{yi} y_i}{\sum_{i=1}^n k_{yi}} \quad (I.2)$$

Avec :

k_{xi} et k_{yi} : rigidités latérales des éléments de résistance

n : nombre des éléments dans l'étage considéré

x_i et y_i coordonnées de l'élément i dans un repère global choisi

- L'approche qui considère que le CR, au niveau de chaque étage, comme le point par lequel l'application de la résultante des efforts tranchants latérale ne produit aucune rotation dans tous les étages (Cheung et Tso, 1986).
- L'approche qui soutient que le CR, dans n'importe quel étage, est le point par lequel l'application d'une force sismique ne cause pas de rotation dans cet étage, alors que le reste des étages peut tourner (Cheung et Tso, 1986). Cette technique ne donne pas de formules d'application pratique.

- Une autre approche, similaire à la précédente, considère, quant à elle, que les autres étages ne tournent pas aussi [Smith et Vezina, 1985]. Cette technique peut être formulée de la façon suivante :

$$X_{CR,m} = \frac{\sum_{i=1}^n ((V_{yi,m} - V_{yi,m-1})x_i)}{F_{y,m}} \quad (I.3)$$

$$Y_{CR,m} = \frac{\sum_{i=1}^n ((V_{xi,m} - V_{xi,m-1})y_i)}{F_{x,m}} \quad (I.4)$$

Avec :

$V_{yi,m}$ et $V_{xi,m}$: efforts tranchants dans l'élément i à l'étage m , dans les directions x et y

$F_{x,m}$ et $F_{y,m}$: forces appliquées dans les directions x et y au même niveau

n : nombre des éléments de résistance dans l'étage considéré.

m : nombre d'étages

x_i et y_i coordonnées de l'élément i dans un repère global choisi

- L'approche proposée dans l'Eurocode 8-1 où le CR est fonction des propriétés structurales et indépendant de la valeur absolue du chargement [Makarios et Anastassiadis, 1998]. En revanche, l'amplitude de la force à chaque niveau doit être proportionnelle à la hauteur du niveau considéré par rapport à la base de la structure. La technique de cette approche est comme suit : pour évaluer le centre de la rigidité à un diaphragme particulier, la structure est analysée par son modèle en trois dimensions avec trois cas de charge. Les charges, choisies par simple commodité, sont appliquées au centre de masse (ou un point arbitraire). Le premier cas de charge ($V_x=P$ kN) est appliqué dans une direction principale de la structure (Figure I.1a), donnant une rotation du plancher R_{zx} . De même, le deuxième cas de charge de même valeur ($V_y=P$ kN) est appliquée dans l'autre direction horizontale principale, donnant une rotation du plancher R_{zy} (Figure I.1b). Enfin, le troisième cas de charge (un moment de rotation d'axe vertical $M_z=P$ kN.m) est appliqué selon l'axe Z , donnant une rotation du plancher R_{zz} (Figure I.1c). Ainsi, la distance entre les centres de masse et de rigidité dans la direction X peut être prise à chaque niveau comme la rotation due aux forces dans la direction Y divisée par la rotation sous l'effet des moments :

$$e_x = \frac{-R_{ZY}}{R_{ZZ}} \quad (I.5)$$

De même, la distance entre les centres de masse et de rigidité dans la direction Y peut être prise comme la rotation due aux forces dans la direction X divisée par la rotation sous l'effet des moments :

$$e_y = \frac{-R_{ZX}}{R_{ZZ}} \quad (I.6)$$

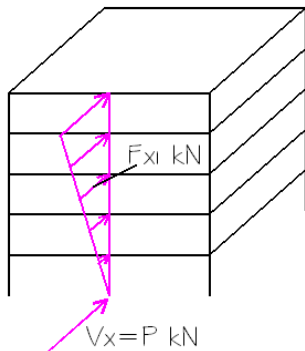


Figure I.1a. Système de forces sismiques F_{xi} suivant la direction X

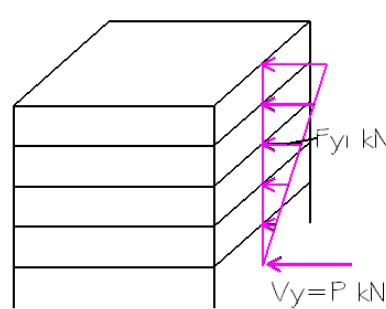


Figure I.1b. Système de forces sismiques F_{yi} suivant la direction Y

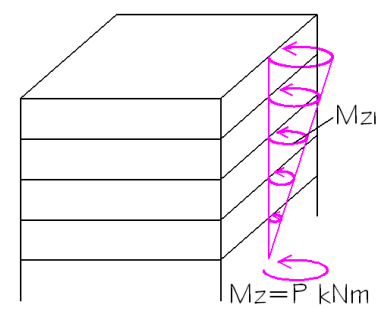


Figure I.1c. Système de moments M_{zi} d'axe vertical Z

I.1.4. Les diverses définitions du centre de rigidité donnent-elles les mêmes résultats ?

Pour illustrer la concordance ou les différences entre les résultats des différentes approches de calcul des centres de rigidité, une comparaison numérique a été menée, à partir de trois types de structures : les deux premières de forme régulière, l'une en portiques autostables (Figure I.2) et l'autre mixte, c'est-à-dire en voiles et portiques (Figure I.3). La troisième de forme irrégulière en L, en portiques autostables (Figure I.5a). Deux approches ont été sélectionnées : celle des rigidités relatives (centre des raideurs), la technique la plus utilisée par nos ingénieurs et celle recommandée par l'Eurocode 8-1, technique plus générale et plus réaliste. Quant aux approches restantes, elles ne sont pas pratiques pour les concepteurs, voire elles ne disposent pas du tout de formules simples.

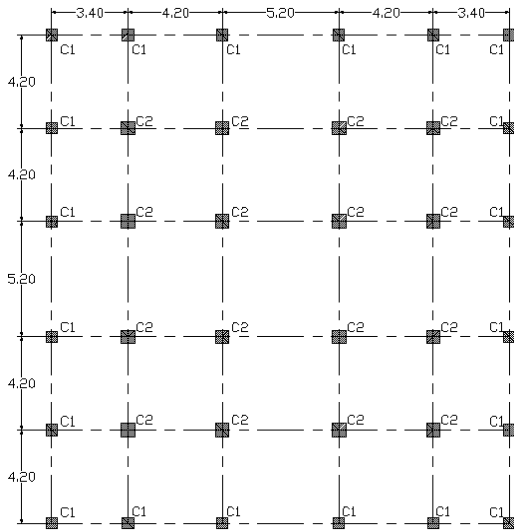


Figure I.2. Caractéristiques géométriques de la structure autostable étudiée

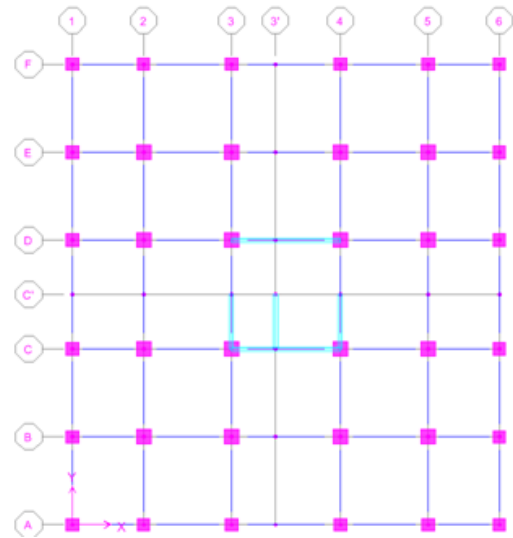


Figure I.3. Caractéristiques géométriques de la structure contreventée étudiée

La comparaison des résultats des deux approches étudiées montre clairement des écarts dans la localisation des CR pour la structure mixte (portiques et voiles). De surcroît, on constate que les CR ne sont pas sur une même ligne verticale (Figure I.4b). Ceci est d'une importance capitale pour le classement de la structure comme régulière ou irrégulière.

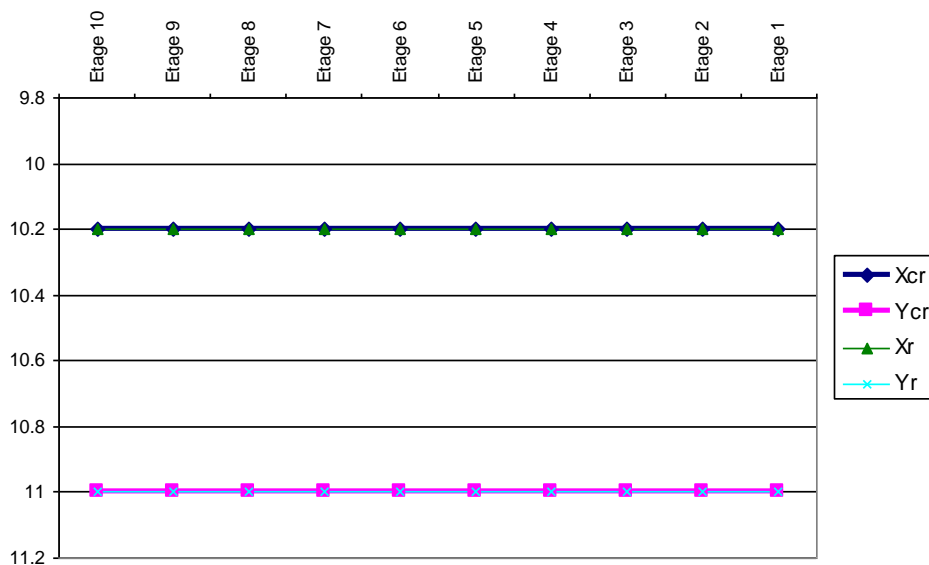


Figure I.4a. Localisation des CR par les deux approches de la structure en portiques (coordonnées en mètres)

- X_{cr} et Y_{cr} sont les coordonnées du CR par la technique des centres de raideurs
- X_r et Y_r sont les coordonnées du CR par la technique recommandée par l'Eurocode 8

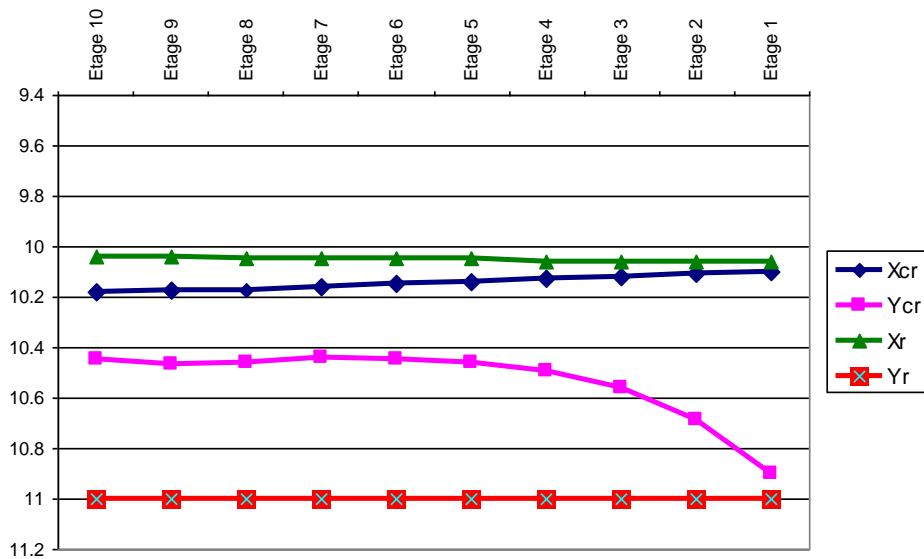


Figure I.4b. Localisation des CR par les deux approches de la structure contreventée par des voiles (coordonnées en mètres).

- X_{cr} et Y_{cr} sont les coordonnées du CR par la technique des centres de raideurs.
- X_r et Y_r sont les coordonnées du CR par la technique recommandée par l'Eurocode 8

En revanche, les deux méthodes donnent des résultats identiques pour la structure en portiques autostables (Figure 4a) et des résultats plus ou moins comparables pour la structure irrégulière en forme de L (Figure 5b).

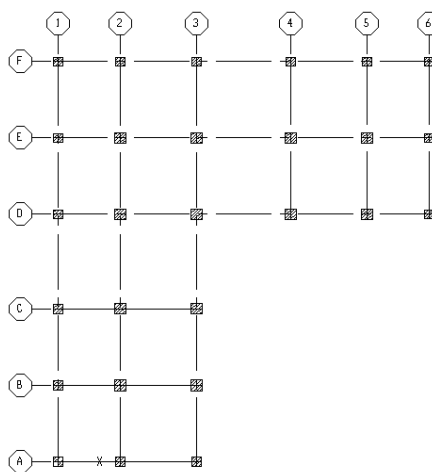


Figure I.5a. Caractéristiques géométriques de la structure contreventée étudiée

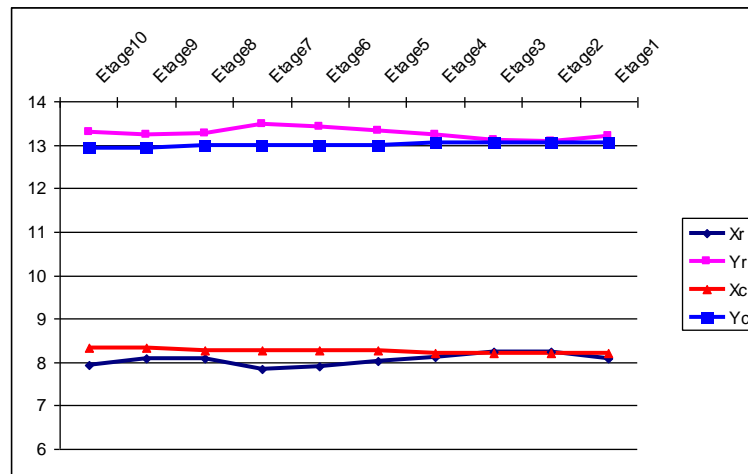


Figure I.5b. Système de forces F_{xi} suivant la direction X.

- X_{cr} et Y_{cr} sont les coordonnées du CR par la technique des centres de raideurs.
- X_r et Y_r sont les coordonnées du CR par la technique recommandée par l'Eurocode 8-1.

Il convient de noter que toutes les approches concernant le calcul des coordonnées des centres de rigidité donnent des résultats identiques pour les structures à un seul niveau. Mais leur extrapolation à des bâtiments à plusieurs niveaux donne des différences non négligeables,

hormis pour les structures dont les déformations des éléments individuels de contreventement soumis à des actions horizontales ne sont pas très différentes. C'est le cas de systèmes de portiques ou de voiles. Mais, ce n'est pas le cas avec des systèmes de contreventement mixte (portiques et voiles). En effet, dans ce dernier cas, l'interaction entre les portiques et les voiles perturbe leurs déformations et génère un couplage inter-étages. Ainsi, les positions des centres de rigidité sont influencées, en plus des rigidités relatives des éléments de contreventement au niveau de chaque étage, par la distribution des forces sismiques dans lesdits éléments dans les étages supérieurs au niveau analysé.

Enfin, il convient de souligner que l'ingénieur en structures est contraint de vérifier, au moment de la modélisation de sa structure, l'approche utilisée, par le logiciel, pour le calcul des centres de rigidité.

1.2. Analyse des effets de la torsion accidentelle

1.2.1. Excentricité accidentelle

L'excentricité accidentelle a plusieurs origines :

- Une distribution défavorable des charges d'exploitation durant le séisme qui diffère de celle uniforme assumée lors de la conception.
- La non prise en compte de la rigidité des murs de remplissage, considérés comme des éléments secondaires et négligés dans la conception et le calcul parasismiques.
- La différence entre la distribution en plan de la rigidité réelle des éléments structuraux et celle nominale utilisée dans la conception (basée uniquement sur la géométrie de la section des éléments, section non fissurée, sans armatures).
- Les mouvements différentiels horizontaux du sol.

Lorsque la répartition en plan des rigidités et des masses est asymétrique, la réponse structurale aux composantes sismiques horizontales contient un couplage entre les modes de translation et de torsion. L'analyse structurale tridimensionnelle, modale spectrale ou dynamique non-linéaire, prend en compte ce couplage d'une manière très satisfaisante (voir chapitre II).

Les codes parasismiques en vigueur essaient aussi de tenir compte de l'excentricité accidentelle en amplifiant ou en dés-amplifiant l'excentricité théorique, dite aussi structurale, c'est-à-dire la distance entre les centres des masses et de rigidités (voir Figure I.6). Cette pratique rend l'analyse dynamique critiquable et pénible. Car, d'une part, elle renvoie à la problématique, abordée précédemment, de la détermination du centre des rigidités des structures à plusieurs niveaux. Comme nous l'avons vu lesdits codes ne donnent aucune définition claire quant au calcul de ce centre. D'autre part, la localisation ambiguë du centre rigidités ne vaut pas l'effort des analyses additionnelles, fastidieuses, nécessaires pour assurer l'exactitude de l'analyse avec l'amplification dynamique de l'excentricité structurale (voir chapitre II).

Dans un bâtiment dont les masses et les rigidités sont réparties symétriquement, l'analyse sous les actions sismiques horizontales ne produit aucune réponse structurale de torsion. Cependant, une réponse sismique conventionnelle ne peut pas prendre en compte les variations possibles de la rigidité ou de la distribution des masses par rapport aux hypothèses de calcul, ou la possible torsion de la composante sismique d'axe vertical due aux mouvements différentiels du sol. De tels effets produisent la torsion même pour un bâtiment considéré comme symétrique du point de vue conception. Pour limiter les conséquences de cette torsion imprévue (accidentelle), la plupart des codes sismiques introduisent ses effets en décalant les centres des masses, par rapport à leurs positions estimées, d'une excentricité additionnelle appelée « excentricité accidentelle » (voir Figure I.6).

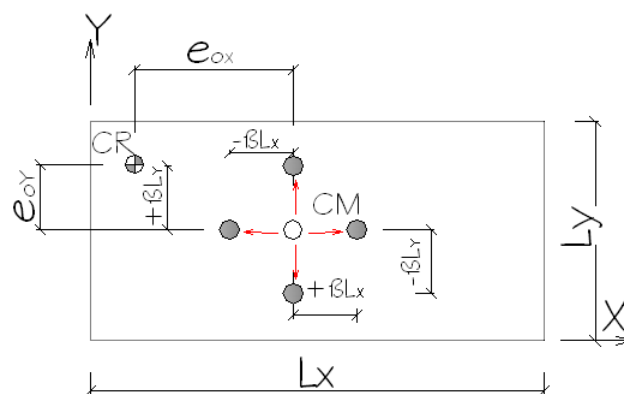


Figure I.6. Principe du décalage de la masse

I.2.2. Estimation des effets de l'excentricité accidentelle par l'analyse statique linéaire

D'une manière générale l'excentricité totale (c'est-à-dire : excentricité structurale plus l'excentricité accidentelle) s'écrit de la manière suivante :

$$e_t = \alpha e_{si} + \beta L_i \quad (I.7)$$

$$e_t = \delta e_{si} - \beta L_i \quad (I.8)$$

e_t : Excentricité totale de l'étage i

e_{si} : Excentricité structurale de l'étage i

L_i : Dimension du bâtiment à l'étage i , côté perpendiculaire au séisme

α, β, δ : Coefficients spécifiés dans le tableau 1 ci-dessous

Chaque pays dispose de ces coefficients spécifiés dans son règlement parasismique en vigueur.

Tableau I.1. Coefficients de prise en compte de l'excentricité dans les codes parasismiques

Code parasismique	α	β	δ
Règles Parasismiques Algériennes RPA99 2003	1.0	0.05	1.0
National Earthquake Hazard Reduction Program, NEHRP 1997	1.0	0.05	1.0
International Building Code IBC, 2003	1.0	0.05	1.0
Eurocode 8, 2003	1.0	0.05	1.0
Turkish Code, 2006	1.0	0.05	1.0
Indian Standard, Criteria for earthquake resistant, 2002	1.5	0.05	1.0
Code National du Bâtiment du Canada, CNBC, 1995.	1.5	0.1	0.5
Mexico City Building Code, 1995	1.5	0.1	1.0

Dans le cas où le code parasismique spécifie $\alpha = \delta = 1.0$, la localisation du centre de rigidité n'est pas indispensable pour tenir en compte les effets de torsion. Dans ce cas, un bâtiment disposant d'un plancher rigide peut être analysé en appliquant la force latérale sismique (force statique équivalente) à une distance de $\pm \beta L_i$ du centre des masses. Pour la prise en compte de l'excentricité accidentelle, une distinction est faite entre l'analyse par deux modèles plans orthogonaux et celle d'un modèle spatial, dans tous les codes parasismiques analysés (c'est-à-dire disponibles):

- Algérie : Règles Parasismiques Algériennes (RPA 99 modifiées 2003)
- Europe : Eurocode n°8
- Nouvelle Zélande : Structural Design NZS 1170-5, 2004
- Inde : Indian Standard, Criteria for earthquake resistant, 2002
- France : PS 92
- Code National du Bâtiment du Canada, CNBC, 1995.

En plus des recommandations de l'Eurocode 8 que nous aborderons plus loin, trois pratiques méritent d'être exposées dans le cas d'une analyse statique suivant deux plans orthogonaux. Ces différentes pratiques montrent bien la difficulté de maîtriser la torsion d'axe vertical dans les analyses sismiques des structures.

- a) Les RPA99 modifiées 2003 prévoient dans l'article 4.2.7 intitulé « *Effet de la torsion d'axe vertical* » ce qui suit :

« L'augmentation de l'effort tranchant provoqué par la torsion d'axe vertical due à l'excentricité entre le centre de gravité et le centre de rigidité doit être prise en compte. Les efforts tranchants négatifs dus à la torsion devront être négligés. Pour toutes les structures comportant des planchers ou diaphragmes horizontaux rigides dans leur plan, on supposera qu'à chaque niveau et dans chaque direction, la résultante des forces horizontales a une excentricité par rapport au centre de torsion égale à la plus grande des deux valeurs :

-5% de la plus grande dimension du bâtiment à ce niveau (cette excentricité doit être prise en considération de part et d'autre du centre de torsion).

- excentricité théorique résultant des plans ».

- b) Le CNBC canadien 1995 propose de calculer le moment de torsion d'axe vertical d'un plancher au niveau i selon les deux équations I.9 et I.10 :

$$Mt_i = F_i(1.5e_s \mp 0.1b_i) \quad (\text{I.9})$$

ou

$$Mt_i = F_i(0.5e_s \mp 0.1b_i) \quad (\text{I.10})$$

F_i : Force sismique au niveau du plancher i calculée par la méthode statique.

e_s : distance mesurée perpendiculairement à la direction de la force sismique entre le centre des masses et le centre de rigidité du niveau considéré.

b_i : dimension en plan du bâtiment au niveau i perpendiculaire à la direction de la force sismique considérée.

La valeur de $0.1b_i$ représente la torsion accidentelle égale 10% de la dimension de l'étage en plan contre 5% des RPA.

Le code parasismique indien adopte lui aussi les mêmes équations que le CNBC canadien mais avec des coefficients différents, comme le montrent les deux équations I.11 et I.12 :

$$Mt_i = F_i(1.5e_s \mp 0.05b_i) \quad (\text{I.11})$$

ou

$$Mt_i = F_i(e_s \mp 0.05b_i) \quad (\text{I.12})$$

- c) Règles parasismiques françaises PS 92, spécifient de conduire quatre calculs différents, résumés dans ce qui suit (Figure I.7a). On déplace le point d'application des forces statiques équivalentes de e'_r dans un sens (voir Figure I.7b) et dans l'autre (voir Figure I.7c). e'_r étant défini comme suit :

$$e'_r = 0.1L_rZ_r \quad (\text{I.13})$$

Et

$$Z_r = \frac{h_r}{H} \quad (\text{I.14})$$

L_r : dimension horizontale du plancher dans la direction perpendiculaire au séisme.

h_r : hauteur du centre de gravité des masses de l'étage considéré.

H : Hauteur totale du bâtiment

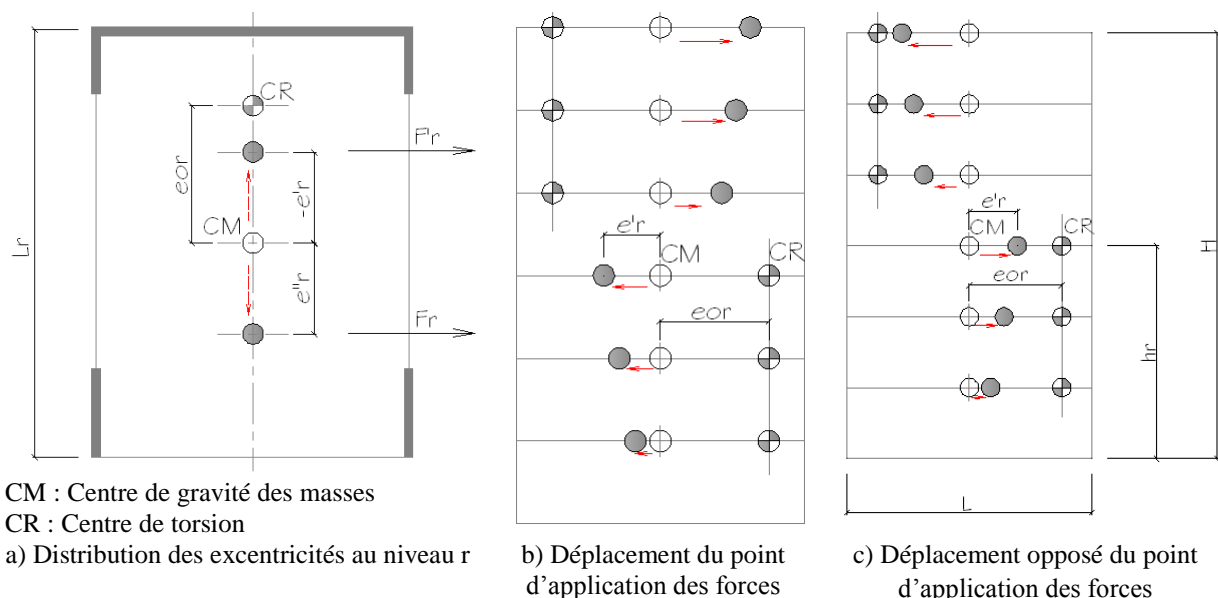


Figure I.7. Point d'application des forces statiques équivalentes

Dans l'analyse statique linéaire, les effets de la torsion accidentelle dans une seule direction de calcul peuvent être calculés par une analyse statique linéaire à partir d'un modèle spatial, en appliquant des moments de torsion M_{ai} d'axe vertical à chaque niveau. Il n'est

généralement pas nécessaire de faire le signe de l'excentricité d'un niveau à l'autre. Pour chaque direction de calcul, il suffit d'appliquer le même signe à tous les niveaux pour obtenir l'effet le plus défavorable.

$$M_{ai} = \pm F_i e_{ai} \quad (I.15)$$

où F_i est la force horizontale agissant au niveau i , obtenue par le calcul sismique et e_{ai} est l'excentricité accidentelle (voir Figure I.6).

Dans le cadre de l'analyse statique linéaire, cette prise en compte de la torsion accidentelle provoque le même effet que le décalage des masses.

Par analogie, si l'analyse modale spectrale est employée, les moments de torsion dans chaque étage peuvent être calculés comme le produit de : l'excentricité accidentelle de l'étage considéré, la masse de l'étage considéré et l'accélération de l'étage considéré dans la direction de calcul, obtenue à partir de la Combinaison Quadratique Complète « CQC » des accélérations de tous les modes retenus. L'Eurocode 8-1 permet de prendre, au lieu de cela, des moments de torsion au niveau des étages comme le produit, au niveau de chaque étage considéré, de la charge latérale déterminée de l'analyse statique linéaire et de l'excentricité accidentelle. C'est plus simple pour la programmation informatique, particulièrement si dans les deux directions de calcul, l'excentricité accidentelle est constante à tous les niveaux (c'est-à-dire, si tous les étages ont les mêmes dimensions en plan). Puis il suffit d'effectuer une analyse statique simple pour des moments de torsion d'étage proportionnels à la force sismique de chaque étage pour un effort tranchant global à la base de la structure égale à l'unité $V=1.0$. Les effets de l'excentricité accidentelle dans chaque direction de calcul peuvent être obtenus alors en multipliant les résultats de cette analyse simple par le cisaillement globale à la base V , correspondant au premier mode fondamental dans la direction horizontale de calcul et par l'excentricité additionnelle (constante dans tous les étages).

Si les planchers au niveau des étages sont considérés comme diaphragmes rigides, le moment de torsion d'axe vertical d'un étage peut être appliqué à un nœud du plancher : le nœud maître. Si un diaphragme ne peut être considéré comme rigide et sa flexibilité dans son plan est prise en compte dans le modèle spatial de la structure, il convient de remplacer le moment de torsion d'un étage par des moments nodaux dans chaque masse nodale m_i , égale au produit de l'excentricité accidentelle et de la force sismique latérale correspondant à cette masse.

I.2.3. Cas de calcul dynamique tridimensionnel

Dans le cas d'une analyse dynamique tridimensionnelle, les règlements parasismiques se mettent d'accord pour ne retenir qu'une seule méthode pour prendre en compte les effets de la torsion d'axe vertical. Ainsi, en plus de l'excentricité théorique calculée, une excentricité accidentelle (additionnelle) égale à $\mp\beta L$ (L étant la dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique) doit être appliquée au niveau du plancher considéré et suivant chaque direction (Figure I.6). La valeur de β varie d'un pays à l'autre (voir tableau I.1) des coefficients de prise en compte de l'excentricité dans les codes parasismiques).

Seules les règles françaises PS 92 se distinguent encore une fois par la pratique d'une excentricité accidentelle en déplaçant le centre de gravité théorique des masses par une translation latérale e' définie comme suit :

$$e'_x = 0.05L_{rx} \quad (I.16)$$

$$e'_y = 0.05L_{ry} \quad (I.17)$$

Avec L_{rx} et L_{ry} : r : dimension horizontale du plancher dans la direction x ou y perpendiculaire au séisme.

Dans l'analyse on doit considérer, et contrairement au reste des codes parasismiques, les deux modèles indiqués ci-dessous :

- Les masses sont toutes écartées du centre de torsion de l'étage considéré de la quantité (e'_x, e'_y) .
- Les masses sont rapprochées du centre de torsion de l'étage considéré de la quantité (e'_x, e'_y) .

Les différents déplacements sont résumés dans la figure I.8 ci-dessous.

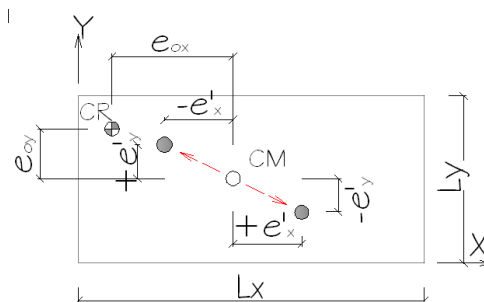


Figure I.8. Différents déplacements imposés par les règles PS92

Dans une analyse dynamique (spectrale ou non linéaire), les masses peuvent être décalées de leur position nominale par l'excentricité accidentelle. Cette démarche produit quatre modèles dynamiques au total, avec différentes caractéristiques dynamiques (des périodes naturelles et des modes propres) et nécessite l'emploi de l'enveloppe des effets de l'action sismique des quatre analyses. Cette démarche qui n'est pas pratique se fait au détriment non seulement d'effort informatique considérable, mais également de notre compréhension de la réponse dynamique. Par conséquent, on a recours à cette pratique seulement dans le cadre de l'analyse non linéaire (dynamique et souvent pour la statique) pour l'évaluation des bâtiments existants, mais très rarement dans l'analyse modale spectrale pour la conception (voir Chapitre II). Les codes sismiques autorisent normalement de remplacer l'excentricité accidentelle des masses de leurs positions nominales, par une excentricité accidentelle des actions sismiques horizontales. Les effets de l'excentricité accidentelle sont déterminés alors par des approches statiques exposées précédemment (voir la section I.2.2).

I.2.4 Combinaison des effets de l'excentricité accidentelle dus aux deux composantes horizontales du séisme dans le cas de l'analyse linéaire

Une excentricité accidentelle est associée à chaque direction de calcul, X ou Y, de l'action sismique horizontale. Le total des effets de la composante sismique de translation suivant la direction X, y compris l'effet de l'excentricité accidentelle e_x , est considéré comme EX. C'est cet effet total qui est combiné avec le total des effets de la composante sismique de translation dans la direction Y, appelé EY, (qui inclut également l'effet de l'excentricité accidentelle e_y) et parfois avec les effets de la composante verticale suivant la direction Z. Il convient de souligner que les règlements parasismiques en vigueur ne donnent aucune indication quant au mode de combinaison des effets de l'excentricité avec ceux résultant des efforts sismiques de translation obtenus par analyse dynamique.

Pour mieux percevoir l'importance de la combinaison des effets de l'excentricité accidentelle, il nous a paru utile d'exposer l'Exemple suivant (Fajfar et Kreslin, 2012) : le bâtiment étudié est une structure en béton armé en R+6 avec deux sous-sols. Il s'agit de comparer les deux options de combinaison des moments de torsion représentant les effets de l'excentricité accidentelle et les résultats obtenus à partir de l'analyse modale spectrale.

Dans la première option, l'enveloppe des effets résultant des quatre moments de torsion accidentelle (correspondant aux quatre décalages du centre de masse : $+M_{xi}$, $-M_{xi}$, $+M_{yi}$, $-M_{yi}$) est ajoutée à la combinaison (SRSS) des résultats de l'action sismique dans les deux calculs dans l'analyse modale spectrale.

Dans la seconde option, tout d'abord, les effets résultant du moment de torsion, dus au séisme dans une seule direction de calcul avec deux positions du centre de masse, sont combinés avec les résultats de l'analyse modale spectrale pour la même direction de calcul. Ensuite, les résultats obtenus pour les deux directions de calcul sont combinés par SRSS.

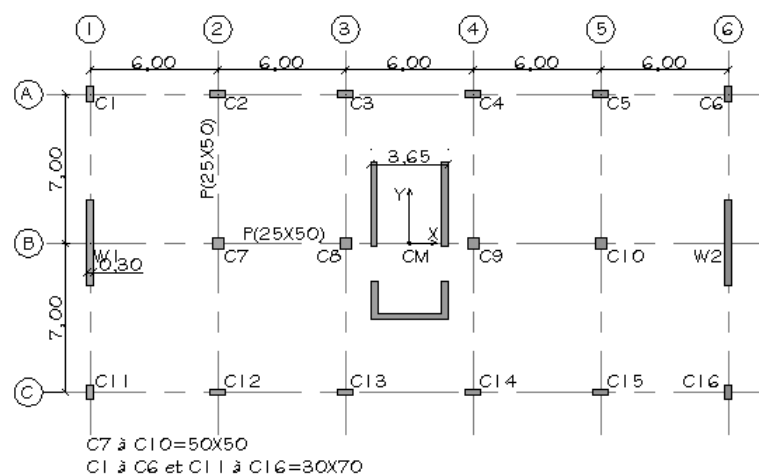


Figure I.9. Configuration en plan de la structure étudiée

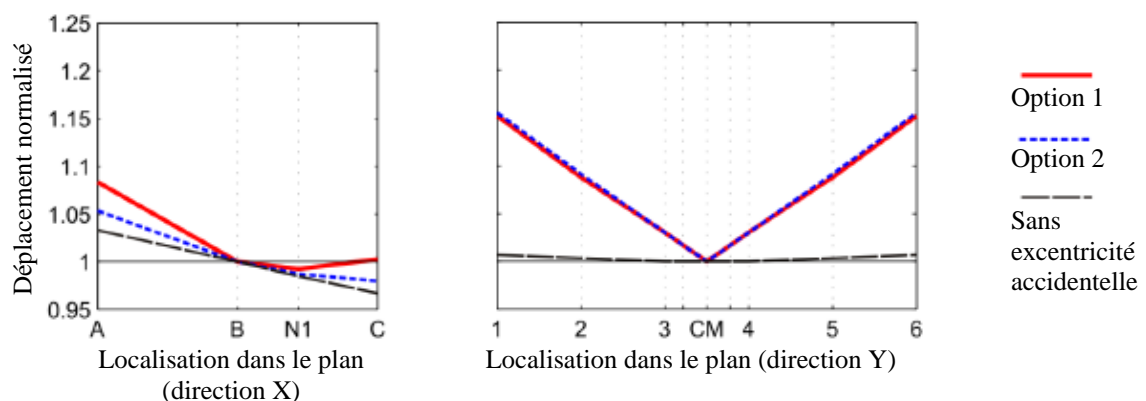


Figure I.10. Effets de la torsion accidentelle en termes de déplacements normalisés dans les deux directions de calcul.

Les deux options sont comparées en termes de déplacements maximum normalisés (Figure I.10). Le déplacement normalisé est le rapport entre le déplacement d'un point arbitraire du plancher terrasse et le déplacement du centre de masse (CM). Il est clair que les deux types

de combinaison (options 1 et 2) donnent les mêmes résultats pour la direction Y présentant une symétrie. En revanche, dans la direction X, non symétrique, c'est l'option 1 qui donne les valeurs les plus élevées.

I.2.5. Estimation simplifiée des effets de l'excentricité accidentelle dans l'Eurocode 8-1

L'Eurocode 8-1 se distingue des règlements parasismiques évoqués ci-dessus, pour la prise en compte des effets de torsion accidentelle, par l'esprit de simplification.

Quelle que soit la méthode de calcul utilisée, l'Eurocode 8-1 stipule, à l'instar des règlements parasismiques existants, qu'une « torsion accidentelle » doit être prise en compte dans le calcul. Une excentricité additionnelle est appliquée aux masses des différents niveaux. Sa valeur est :

$$e_{ai} = \pm 0.05L_i \quad (\text{I.18})$$

Avec :

e_{ai} est l'excentricité accidentelle de la masse du niveau i par rapport à sa position nominale, appliquée dans la même direction à tous les niveaux.

L_i est la dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique.

L'originalité de l'Eurocode 8-1, c'est qu'en variante, la torsion accidentelle peut être prise en compte par une des méthodes forfaitaires suivantes :

- Dans le cas où un modèle spatial est utilisé, les effets de torsion accidentels peuvent être déterminés en appliquant des moments de torsion M_{ai} d'axe vertical (Figure 9-2) à chaque niveau i :

$$M_{ai} = \pm F_i e_{ai} \quad (\text{I.19})$$

Avec :

F_i est la force horizontale agissant au niveau i , obtenue par le calcul sismique et e_{ai} est l'excentricité accidentelle (voir Figure I.6).

e_{ai} : excentricité accidentelle de la masse du niveau i par rapport à sa position nominale, appliquée dans la même direction à tous les niveaux.

- Dans le cas d'une analyse statique linéaire, l'Eurocode 8 permet de prendre en compte les effets des excentricités accidentelles dans les bâtiments dont les raideurs latérales et les masses sont distribuées symétriquement en plan d'une manière très pratique et simple. Il s'agit d'amplifier les effets des actions sismiques (solicitations et déplacements) sur les éléments de contreventement situés à une distance x du centre de gravité (Figure I.11), en leur appliquant un coefficient amplificateur égal à :

$$\delta = 1 + 0.6 \frac{X}{L_e} \quad (I.20)$$

Avec :

X : la distance en plan de l'élément considéré au centre de masse du bâtiment en plan, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée ;

L_e : est la distance entre les deux éléments de contreventement extrêmes, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.

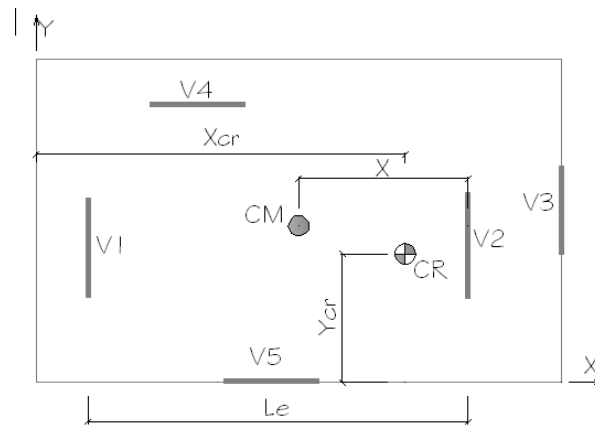


Figure I.11. Définition de L_e et X .

Dans le cas où deux modèles plans orthogonaux sont utilisés, la méthode consiste à amplifier les effets des actions sismiques (solicitations et déplacements) sur les éléments de contreventement situés à une distance x du centre de gravité (Figure I.11), en leur appliquant un coefficient amplificateur égal à :

$$\delta = 1 + 1.2 \frac{X}{L_e} \quad (I.21)$$

Cette approche simplifiée a fait l'objet de nombreuses critiques, elle est jugée trop conservatrice, un facteur de 2 en moyenne (Fardis et al. 2005).

I.2.6. L'excentricité accidentelle dans l'analyse non linéaire

Dans l'analyse dynamique non linéaire les masses sont décalées de leur position nominale par « l'excentricité accidentelle ». Le décalage est dans la même direction à tous les étages. Dans l'analyse spatiale ceci donne quatre modèles dynamiques à soumettre à chaque action sismique (en général, excitation bidirectionnelle). Si l'analyse est effectuée pour des actions sismiques unidirectionnelle), les masses sont décalées seulement perpendiculairement à l'excitation et il y a deux modèles à analyser chaque composante sismique horizontale.

La même approche devrait être suivie pour l'analyse statique non linéaire, qui est normalement effectuée séparément pour chaque composante sismique horizontale, donnant ainsi lieu à deux modèles à analyser avec l'application de l'action sismique dans le sens positif et négatif.

Cette approche ne peut pas être utilisée donc que pour une structure spatiale. Si un modèle plan est employé pour chaque composante horizontale de l'action sismique, comme permis par l'Eurocode 8 pour des bâtiments répondant aux critères pour la régularité dans le plan, les effets de l'excentricité accidentelle peuvent seulement être estimés par l'approche simplifiée décrite dans la section I.2.5.

Conclusion

Les codes parasismiques en vigueur essaient de tenir compte de l'excentricité accidentelle par des approches critiquables et pénibles. Par ailleurs, lesdits codes ne donnent aucune procédure claire pour la mise en œuvre de l'excentricité accidentelle. Aussi, le non fondement de l'approche dynamique de l'excentricité accidentelle, inspirée de la statique, ne vaut pas l'effort des analyses additionnelles, fastidieuses, nécessaires pour assurer l'exactitude de l'analyse, comme le montre le chapitre suivant.

CHAPITRE II

L'EXCENTRICITE ACCIDENTELLE ET LE CALCUL DYNAMIQUE

Introduction

Malgré que la plupart des codes parasismiques existants préconise la prise en compte de l'excentricité accidentelle, en déplaçant le centre de masse de sa position nominale d'une certaine distance, aucun d'entre eux, notamment les RPA99/2003, ne donne la procédure à suivre pour effectuer ce décalage dans la matrice des masses. Ce constat est également valable dans la littérature spécialisée (Fan Xuanhua & al., 2014). Rares sont les articles de recherche consacrés à la construction de la matrice des masses en introduisant l'excentricité accidentelle. Ce chapitre relate les différentes méthodes analytiques existantes qui essayent d'introduire l'excentricité accidentelle dans le calcul dynamique.

II.1 Approches analytiques pour le déplacement du centre des masses dans l'analyse modale

Pour déplacer le centre de masses dans le calcul dynamique, on note l'existence de trois approches alternatives utilisées par plusieurs codes de calculs commerciaux :

- L'approche détaillée : basée sur la modification de la matrice des masses concentrées aux nœuds au niveau de l'analyse modale.
- L'approche simplifiée : basée sur l'ajout directement d'un moment statique équivalent additionnel au niveau du calcul sismique.
- L'approche de la Projection Rayleigh-Ritz : permettant de déterminer approximativement les modes propres d'une structure dépendant d'un petit paramètre (en l'occurrence la modification de la matrice des masses) à partir des modes propres initiaux, c'est-à-dire sans le déplacement des centres de gravité des masses.

L'organigramme ci-dessous (Figure II.1) situe le niveau d'intervention de la première et la deuxième approches.

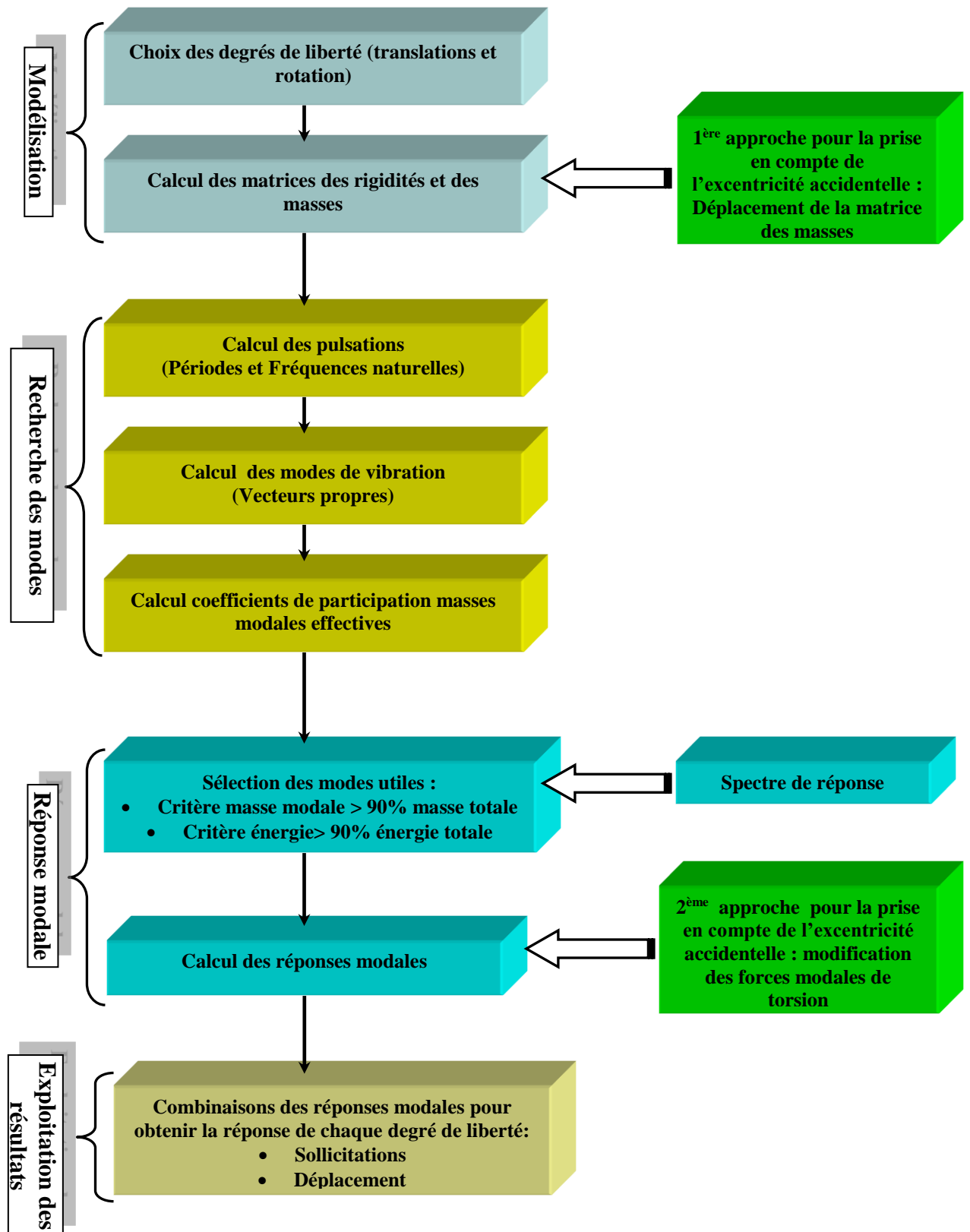


Figure II.1. Méthodologie de prise en compte de l'excentricité accidentelle pour un calcul dynamique tridimensionnel

II.2. Approche détaillée

Le déplacement des centres des masses préconisé par les codes parasismiques consiste d'une manière générale, en l'introduction d'une excentricité additionnelle dans les équations de mouvement. A ce sujet, seules des solutions approchées sont disponibles comme à l'accoutumé dans la dynamique des structures, notamment pour l'élaboration de la matrice des masses élémentaires.

II.2.1. Construction de la matrice de masse des structures asymétriques

Une matrice de masse est normalement pleine, c'est-à-dire certains de ses éléments non diagonaux ne sont pas nuls. Cette matrice est souvent qualifiée de matrice des masses cohérentes ou consistantes. Ceci étant dit, il est intéressant d'un point de vue algorithmique de construire des matrices de masse diagonales, afin de réduire les exigences de stockage en mémoire et de limiter les opérations arithmétiques lors d'une analyse modale. Cette concentration de la masse, disponible en général dans les codes commerciaux d'éléments finis, facilite en outre, comme par exemple la réduction du nombre de degrés de liberté, la résolution numérique des équations différentielles du mouvement.

En prenant en considération la notion de diaphragme rigide, deux méthodes de construction de matrice de masse seront exposées.

a) Cas d'un diaphragme non rigide

Le principe de cette méthode est simple, il suffit de concentrer les masses dans les nœuds en fonction du déplacement effectué du centre de gravité de ces masses. Pour ce faire, considérons une structure d'un seul niveau (Figure II.2). Les deux groupes de nœuds, situés de part et d'autre du centre des masses, peuvent être traités comme deux sous-structures (SS_1 et SS_2) avec un centre des masses chacune situé en C_1 et C_2 , respectivement. Ainsi, l'excentricité additionnelle peut s'effectuer en modifiant chaque masse nodale m_p de la manière suivante (Fan Xuanhna et all ,2014):

$$\bar{m}_p = \left(1 + \frac{\beta L_y}{d_{2y}}\right) m_p, (si p \in SS_1) \quad (\text{II.1a})$$

$$\bar{m}_p = \left(1 - \frac{\beta L_y}{d_{1y}}\right) m_p, (si p \in SS_2) \quad (\text{II.1b})$$

Où d_{1y} est la distance entre les points C et C₁ et d_{2y} est la distance entre les points C et C₂.

Cette approche est facile à programmer numériquement, car on ne change pas les caractéristiques diagonales de la matrice seulement ses valeurs.

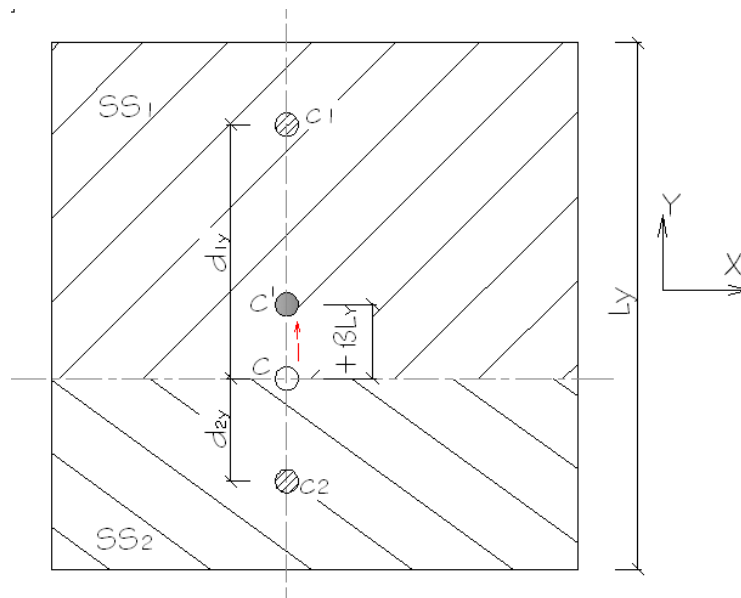


Figure II.2. Création d'une excentricité dans une structure à un seul niveau.

b) Cas d'un diaphragme rigide

La notion de diaphragme rigide est bien connue par les ingénieurs. Selon l'Eurocode 8, dans les bâtiments, les planchers (y compris le toit) jouent un rôle très important dans le comportement sismique d'ensemble de la structure. Ils agissent comme des diaphragmes horizontaux qui collectent les forces d'inertie et les transmettent aux éléments structuraux verticaux et rendent ces éléments solidaires pour résister à l'action sismique horizontale. On assume, en l'occurrence, que tous les points du plancher se déplacent et tournent autour d'un axe vertical comme un corps rigide. En d'autres termes, il n'y a aucune déformation dans le plan du plancher. Le concept des diaphragmes rigides est utilisé depuis plusieurs années puisque ses méthodes simplificatrices sont faciles à mettre en œuvre et bien assimilées par l'ingénieur. En raison du nombre réduit de degrés de liberté associés avec un diaphragme rigide, cette technique s'est avérée être très efficace, particulièrement pour des analyses impliquant la dynamique des structures.

La modélisation d'un diaphragme rigide passe par la définition d'une liaison rigide entre un nœud maître et des nœuds esclaves (voir Figure II.3). Cela signifie que la compatibilité

rigide a été appliquée à tous les déplacements dans ces nœuds. Tous les nœuds liés au nœud maître constituent un groupe de nœuds que l'on peut comparer au corps rigide. Dans notre cas le plancher rigide est définie en tant qu'une membrane liée au nœud maître, à laquelle les nœuds esclaves avec un jeu de degrés de liberté choisis sont ajoutés (pour atteindre la pleine rigidité, il faut choisir tous les degrés de liberté pour les nœuds esclaves). En l'occurrence, Les déplacements verticaux $u_z^{(i)}$ et les rotations autour d'axes horizontaux $u_{\theta x}^{(i)}$ et $u_{\theta y}^{(i)}$ dans les nœuds esclaves sont libres.

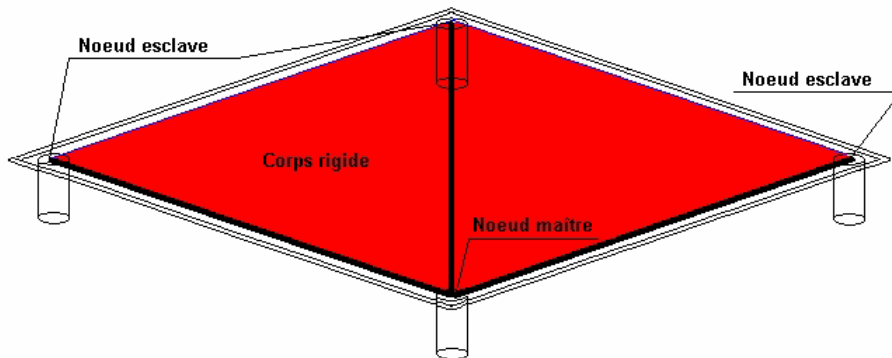


Figure II.3. Principe de modélisation d'un diaphragme rigide.

Les degrés de liberté des nœuds esclaves $u_x^{(i)}$, $u_y^{(i)}$ et $u_{\theta z}^{(i)}$ (Figure II.4.) sont directement déterminés à partir par $u_x^{(m)}$, $u_y^{(m)}$ et $u_{\theta z}^{(m)}$ par ceux du nœud maître à partir des équations (II.2, II.3 et II.4).

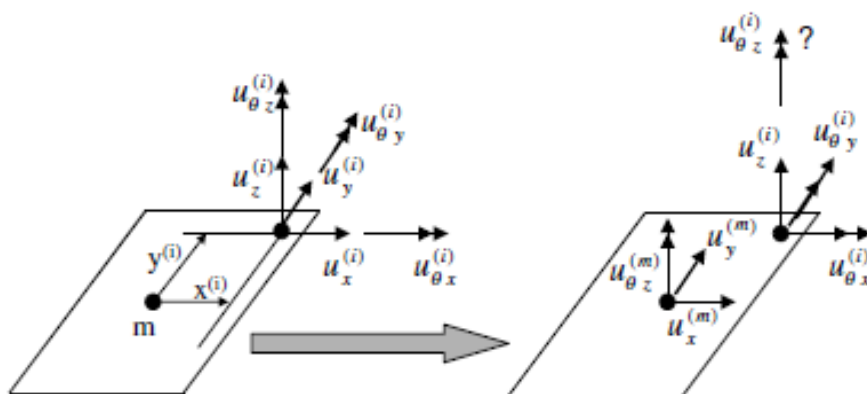


Figure II.4. Relation entre les nœuds maître et esclaves dans une approximation d'un diaphragme rigide

Dans une approximation d'un diaphragme rigide, le nœud maître peut être dans n'importe quel point du diaphragme, dans le cas d'un calcul statique. En revanche, dans le cas

$$K_A = \begin{bmatrix} K_{xn} & 0 & -K_{xn}e_{yn} \\ 0 & K_{yn} & K_{yn}e_{xn} \\ -K_{xn}e_{yn} & K_{yn}e_{xn} & K_{xn}e_{yn}^2 + K_{yn}e_{xn}^2 + K\theta_n \end{bmatrix},$$

$$K_B = \begin{bmatrix} -K_{xn} & 0 & K_{xn}\Delta_{yn-1} \\ 0 & -K_{yn} & -K_{yn}\Delta_{xn-1} \\ K_{xn}e_{yn} & -K_{yn}e_{xn} & -K_{xn}e_{yn}\Delta_{yn-1} - K_{yn}e_{xn}\Delta_{xn-1} + K\theta_n \end{bmatrix}, K_C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$K_D = \begin{bmatrix} K_{xi+1} + K_{xi} & 0 & -K_{xi+1}\Delta_{yi} - K_{xi}e_{yi} \\ 0 & K_{yi+1} + K_{yi} & K_{yi+1}\Delta_{xi} + K_{yi}e_{xi} \\ -K_{xi+1}\Delta_{yi} - K_{xi}e_{yi} & K_{yi+1}\Delta_{xi} + K_{yi}e_{xi} & K_{xi+1}(\Delta_{yi})^2 + K_{yi+1}(\Delta_{xi})^2 + K\theta_{i+1} + K_{xi}(e_{yi})^2 + K_{yi}(e_{xi})^2 + K\theta_i \end{bmatrix}$$

$$K_E = \begin{bmatrix} -K_{xi} & 0 & K_{xi}\Delta_{yi-1} \\ 0 & -K_{yi} & -K_{yi}\Delta_{xi-1} \\ K_{xi}e_{yi} & -K_{yi}e_{xi} & -K_{xi}e_{yi}\Delta_{yi-1} - K_{yi}e_{xi}\Delta_{xi-1} + K\theta_i \end{bmatrix},$$

$$K_F = \begin{bmatrix} K_{x2} + K_{x1} & 0 & -K_{x2}\Delta_{y1} - K_{x1}e_{y1} \\ 0 & K_{y2} + K_{y1} & K_{y2}\Delta_{x1} + K_{y1}e_{x1} \\ -K_{x2}\Delta_{y1} - K_{x1}e_{y1} & K_{y2}\Delta_{x1} + K_{y1}e_{x1} & K_{x2}(\Delta_{y1})^2 + K_{y2}(\Delta_{x1})^2 + K\theta_2 + K_{x1}(e_{y1})^2 + K_{y1}(e_{x1})^2 + K\theta_1 \end{bmatrix}$$

K_{xi} : Rigidité de translation dans la direction X dans l'étage i

K_{yi} : Rigidité de translation dans la direction Y dans l'étage i

$K\theta_i$: Rigidité de torsion dans l'étage i

M_i : Masse de l'étage i

I_i : Moment d'inertie massique dans l'étage i

e_{xi}, e_{yi} : excentricité structurale ou théorique, dans le sens X ou Y, c'est-à-dire la distance entre les centres des masses et des rigidités.

Δ_{xi}, Δ_{yi} : distance, dans le sens X ou Y, entre le centre de gravité de l'étage i et le centre des rigidités de l'étage i+1.

Les éléments non diagonaux de la matrice de masse ou de la matrice de rigidité peuvent être facilement démontrés par les équations d'équilibre des forces d'inertie (Chopra, 1995) ou par l'équation de l'énergie cinétique. Afin de faciliter la compréhension de la prise en compte de l'excentricité accidentelle, prenons cette fois la modification de la matrice de masse pour une structure à un seul niveau. La matrice de masse modifiée pour l'unique masse concentrée sera par l'équation (II.6).

$$\begin{bmatrix} m_{xx} & & -e_{ay}m_{xx} \\ & m_{yy} & e_{ax}m_{yy} \\ -e_{ay}m_{xx} & e_{ax}m_{yy} & I_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

L'énergie cinétique E_c de cette structure à un seul niveau sans excentricité accidentelle est sous la forme suivante (Fan Xuanhua, 2014) :

$$E_c = \left[\frac{1}{2}m_{xx}(u_x)^2 + \frac{1}{2}m_{yy}(u_y)^2 + \frac{1}{2}I_{z,c}(\theta_z)^2 \right] \quad (\text{II.7})$$

Rappelons que m_{xx} et m_{yy} sont les masses totales concentrées de la structure et $I_{z,c}$ est le moment d'inertie massique défini dans la position initiale, c'est-à-dire au point C (Figure II.2).

Avec l'introduction de l'excentricité accidentelle, l'énergie cinétique de la structure excentrée $E_c(e_a)$ est donnée par l'équation (II.8).

$$E_c(e_a) = \left[\frac{1}{2}m_{xx}(\bar{u}_x)^2 + \frac{1}{2}m_{yy}(\bar{u}_y)^2 + \frac{1}{2}I_{z,c'}(\bar{\theta}_z)^2 \right] \quad (\text{II.8})$$

Avec \bar{u}_x , \bar{u}_y , $\bar{\theta}_z$ sont les trois degrés de liberté au point C', c'est-à-dire la nouvelle position du centre des masses après son déplacement et $I_{z,c'}$ défini dans le point c'.

Il peut être démontré géométriquement que :

$$\begin{cases} \bar{u}_x = u_x - \theta_z e_{ay} \\ \bar{u}_y = u_y - \theta_z e_{ax} \\ \bar{\theta}_z = \theta_z \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Et

$$\begin{cases} \bar{I}_{z,c'} = \bar{I}_{z,c} - m_{yy}e_{ay}^2 - m_{xx}e_{ax}^2 \\ \bar{I}_{z,c} = I_{z,c} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

En substituant les variables correspondantes de l'équation (II.8) avec les expressions dans les équations (II.9) et (II.10), on aboutit à l'équation suivante :

$$E_c(e_a) = \left[\frac{1}{2}m_{xx}(u_x)^2 + \frac{1}{2}m_{yy}(u_y)^2 + \frac{1}{2}I_{z,c}(\theta_z)^2 \right] - e_{ay}m_{xx}u_x\theta_z + e_{ax}m_{yy}u_y\theta_z \quad (\text{II.11})$$

En comparant les équations (II.8) et (II.11), l'équation (II.6) peut être facilement déduite.

II.3. Approche simplifiée

Comme son nom l'indique, cette méthode consiste en une simple modification de la procédure de l'analyse modale (Figure II.1). Son principe repose sur l'ajout d'une torsion accidentelle au vecteur des forces correspondant à chaque mode, sans devoir déplacer la masse dans l'analyse modale ; une telle analyse exige uniquement une seule résolution de l'analyse modale qui réduit sensiblement le temps de calculs.

Pour aborder et expliquer cette approche, nous allons exposer brièvement les projections de l'équation de mouvement dans la base modale.

II.3.1. Rappel théorique de l'analyse en base modale

L'équation de mouvement d'une structure à plusieurs degrés de liberté soumise une accélération sismique peut s'écrire :

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\Delta\ddot{u}_s(t) \quad (\text{II.12})$$

Où M, C et K représentent les matrices structurelles de masse, amortissement et raideur ; u, \dot{u} et \ddot{u} sont les vecteurs des déplacements, vitesses et accélérations dans les nœuds, respectivement. Δ est le vecteur unitaire de direction de l'accélération du sol \ddot{u}_s .

Pour une pulsation w_i donnée, le vecteur propre ϕ_i correspondant est obtenu en résolvant

$$(K - Mw_i^2)\phi_i = 0 \quad (\text{II.13})$$

Les N modes propres d'une matrice de dimensions N x N forment une base de vecteurs linéairement indépendants. Ceci signifie donc qu'un vecteur u quelconque s'exprime de façon unique comme combinaison linéaire de ces N vecteurs indépendants. Cette idée de décomposition d'un vecteur dans la base des modes propres peut être étendue à la solution de l'équation du mouvement, en disant qu'une telle décomposition existe à chaque instant t.

$$u(t) = \sum_{i=1}^N q_i(t)\phi_i = \phi q(t) \quad (\text{II.14})$$

Dans cette équation u(t) est le vecteur des coordonnées généralisées, N est le nombre de modes considérés. Les vitesses et accélérations nodales prennent la forme des expressions suivantes :

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=1}^N \phi_i \dot{q}_i(t) \quad (\text{II.15})$$

$$\ddot{u}(t) = \sum_{i=1}^N \phi_i \ddot{q}_i(t) \quad (\text{II.16})$$

Le changement de variable va permettre l'écriture de l'équation du mouvement dans la base modale. Grâce à la relation (II.14), nous allons donc supprimer les inconnues $u(t)$ et les remplacer par les nouvelles inconnues $q(t)$. L'introduction de ce changement de variable dans l'équation du mouvement donne

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = - \left(L_{xi} / M_i \right) \ddot{u}_{sx}(t) \quad (\text{II.17})$$

Dans l'équation (II.17), ξ_i est le coefficient d'amortissement relatif du mode i . L_{xi} et M_i sont définis comme suit :

$$L_{xi} = \phi_i^T M \Delta = \sum_1^N (m_i \phi_{xi}^2) \quad (\text{II.18a})$$

$$M_i = \phi_i^T M \theta_i = \sum_1^N (m_i \phi_{xi}^2 + m_i \phi_{yi}^2 + m_{\theta i} \phi_{\theta i}^2) \quad (\text{II.19b})$$

Le rapport L_{xi} / M_i est défini comme le facteur de participation du mode i dans la direction X du séisme. Dans l'analyse modale spectrale, la solution de l'équation (II.13) pour la réponse maximale du mode i peut s'écrire comme suit :

$$q_{i,max} = \left(L_{xi} / M_i \right) \frac{S_a(T_i)}{\omega_i^2} \quad (\text{II.20})$$

où $S_a(T_i)$ est l'accélération spectrale du mode i obtenue à partir du spectre de réponse réglementaire.

A partir de l'équation de mouvement (II.12), on peut déduire le déplacement maximum dans la direction x du mode i :

$$u_{i,max} = \phi_i q_{i,max} = \phi_i \left(L_{xi} / M_i \right) \frac{S_a(T_i)}{\omega_i^2} \quad (\text{II.21})$$

Par voie de conséquence, le vecteur des efforts sismiques du mode i peut être obtenu de l'équation suivante :

$$F_{i,max} = K u_{i,max} \quad (\text{II.22})$$

Ce même vecteur des efforts sismiques peut être obtenu en utilisant les équations (II.18a et II.19b) et les propriétés des vibrations libres :

$$F_{i,max} = \omega_i^2 M u_{i,max} = M \phi_i \left(\frac{L_{xi}}{M_i} \right) S_a(T_i) \quad (\text{II.23})$$

De la même manière les efforts du mode i qui agissent, à un niveau j de la structure, dans les directions X et Y et le moment de torsion d'axe vertical Z peuvent être déterminés comme suit :

$$F_{xji,max} = m_j \phi_{xji} \left(\frac{L_{xi}}{M_i} \right) S_a(T_i) \quad (\text{II.24})$$

$$F_{yji,max} = m_j \phi_{yji} \left(\frac{L_{xi}}{M_i} \right) S_a(T_i) \quad (\text{II.25})$$

$$F_{\theta ji,max} = m_{\theta j} \phi_{\theta ji} \left(\frac{L_{xi}}{M_i} \right) S_a(T_i) \quad (\text{II.26})$$

Une fois ces efforts sismiques modaux déterminés, la prise en compte de l'excentricité accidentelle deviendra une affaire de calcul statique.

II.3.2. Prise en compte de la torsion accidentelle dans l'analyse modale

Pour ajouter l'effet de la torsion accidentelle dans l'étage j de la structure dans le nième, on modifie l'équation (II.26) en lui ajoutant un moment de torsion additionnel. Ce moment de torsion additionnel est déterminé en appliquant les deux forces $F_{xji,max}$ et $F_{yji,max}$ à une distance e_{aj} du centre de masse (Figure I.5).

$$F_{xji,max} = m_j \phi_{xji} \left(\frac{L_{xi}}{M_i} \right) S_a(T_i)$$

$$F_{yji,max} = m_j \phi_{yji} \left(\frac{L_{xi}}{M_i} \right) S_a(T_i)$$

$$F_{\theta ji,max} = m_{\theta j} \phi_{\theta ji} \left(\frac{L_{xi}}{M_i} \right) S_a(T_i)$$

$$\bar{F}_{\theta i,max} = F_{\theta i,max} + F_{yji,max} e_{axj}$$

$$\bar{F}_{\theta i,max} = F_{\theta i,max} + F_{xji,max} e_{ayj}$$

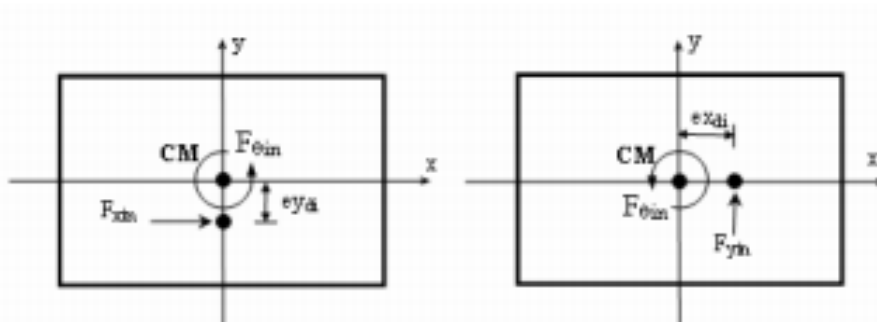


Figure II.5. La prise en compte de la torsion accidentelle dans la méthode simplifiée.

Ainsi, le moment de torsion total sera déterminé par les deux équations (II.27a et II.27b) suivant les directions X et Y respectivement :

$$\bar{F}_{\theta i, max} = F_{\theta i, max} + F_{yji, max} e_{axj} \quad (\text{II.27a})$$

$$\bar{F}_{\theta i, max} = F_{\theta i, max} + F_{xji, max} e_{ayj} \quad (\text{II.27b})$$

où e_{axj} et e_{ayj} désignent les excentricités dans l'étage j dans les directions x et y respectivement.

Une fois le vecteur des forces statiques équivalentes $\bar{F}_{i, max}$ modifié en $\bar{F}_{\theta i, max}$, il va falloir déterminer le vecteur des déplacements nodaux maximaux correspondant, c'est-à-dire avec la prise en compte de l'excentricité accidentelle. Ainsi, le nouveau vecteur des déplacements nodaux maximum sera déterminé en résolvant le système d'équations linéaires suivant :

$$\bar{F}_{i, max} = K\bar{u}_{i, max} \quad (\text{II.28})$$

Ensuite, la procédure de l'analyse sismique sera poursuivie : pour déterminer la réponse maximale pour chaque degré de liberté, on ne peut pas additionner directement les réponses modales maximales. En pratique on doit recourir à une combinaison statistique des réponses modales maximales.

II.3.3. Comparaison des deux approches détaillée et simplifiée

Désormais, nous disposons de deux méthodes pour la prise en compte de l'excentricité accidentelle. Alors la question qui s'impose : donnent-elles les mêmes résultats ?

Pour avoir des éléments de réponse à ces questions, nous avons procédé à des études de cas. Il s'agit des structures représentées ci-dessous (Figures II.7-II.9).

L'analyse sismique a été effectuée, selon les règles parasismiques Algériennes RPA 99, modifiées 2003, avec les caractéristiques suivantes :

- Zone sismique : III
- Groupe d'usage : 1A

- Site : S3
- Coefficient de comportement R : 3.5
- Facteur de qualité Q : 1.15

Il s'agit de structures régulières et symétriques avec des planchers en dalle pleine de 15 cm d'épaisseur. Ainsi les centres de masse et de rigidité se trouvent au centre géométrique du bâtiment (Figure 1.6).

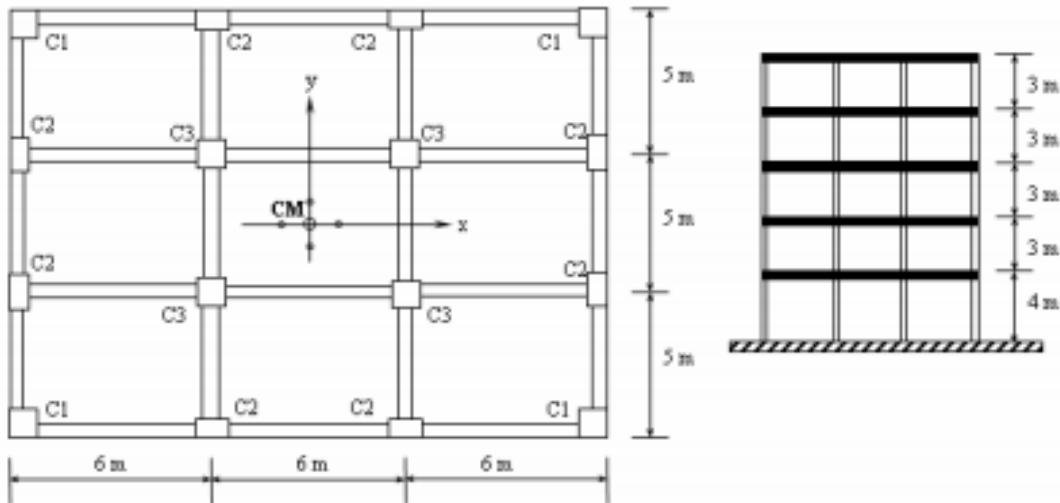


Figure II.6. Vue en plan de la structure type étudiée.

Trois cas de figure ont été analysés : un bâtiment à (01) seul niveau, un bâtiment à cinq (05) niveaux et un bâtiment à dix (10) niveaux. Les dimensions des éléments de structure sont résumées dans le tableau 2 ci-après. Les charges permanentes sont composées des poids propres des planchers en dalle pleine et d'une charge d'un (01) kN par mètre carré. Les charges d'exploitation sont estimées à trois (03) kN par mètre carré. Les dimensions des éléments de structure sont indiquées dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Dimensions des éléments de structure du bâtiment étudié

Eléments de structure	Structure à 01 niveau	Structure à 05 niveaux	Structure à 10 niveaux
Poteau C1 (cm)	30X30	50X50	70X70
Poteau C2 (cm)	25X30	30X50	70X70
Poteau C3 (cm)	30X30	50X50	60X50
Poutre direction X (cm)	25X60	25X60	25X60
Poutre direction Y (cm)	25X60	25X60	25X60
Epaisseur dalle (cm)	15	15	15

Premier cas : Bâtiment à un seul niveau de hauteur de 4 mètres

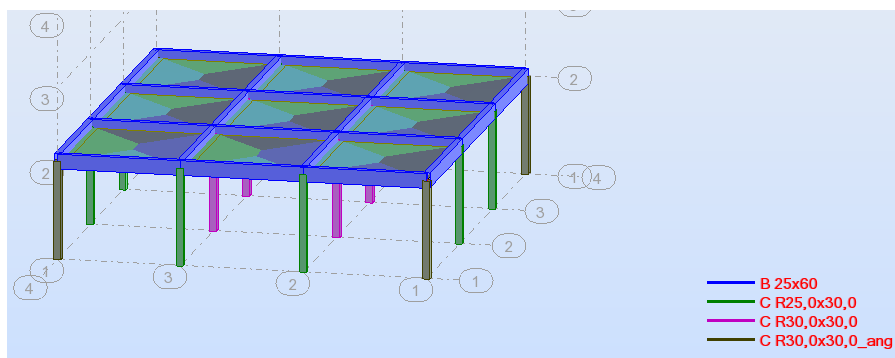


Figure II.7. Modélisation en trois dimensions du premier bâtiment étudié.

Deuxième cas : Bâtiment avec cinq (05) niveaux de hauteur de 4 mètres pour le RDC et 3 mètres pour le reste des étages

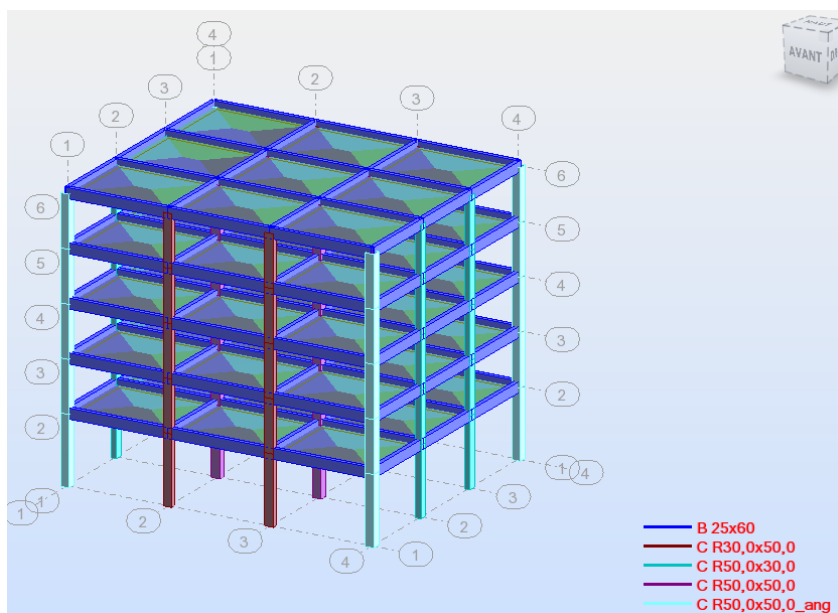


Figure II.8. Modélisation en trois dimensions du premier bâtiment étudié.

Troisième cas : Bâtiment avec dix (10) niveaux de hauteur de 4 mètres pour le RDC et 3 mètres pour le reste des étages

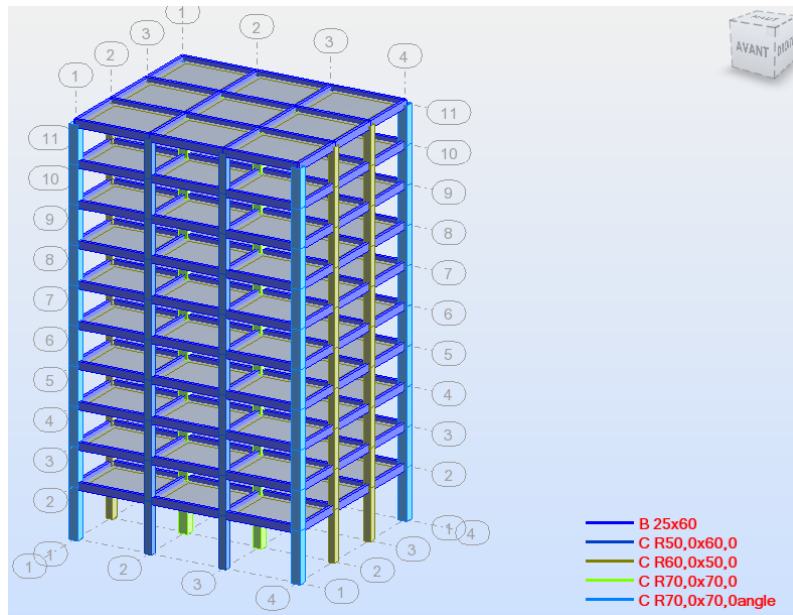


Figure II.9. Modélisation en trois dimensions du premier bâtiment étudié.

II.3.3.1. Résultats des calculs dynamiques obtenus par les approches

Le maximum des déplacements, dans les deux directions X et Y, du plancher du dernier niveau de chaque bâtiment est donné dans le Tableau II.2.

Tableau II.2. Comparaison déplacements maximaux

Bâtiment	Dépl	Dynamique sans excentricité		Dynamique avec excentricité : Approche simplifiée		Dynamique avec excentricité : Approche multimodales	
		Direction X	Direction Y	Direction X	Direction Y	Excent Y+	Excent X+
01 Niveau	U _x (m)	0,01909	0,00002	0,01957	0,0002	0,01915	0,00003
	U _y (m)	0,00001	0,0223	0,00019	0,02284	0,00002	0,02235
05 Niveaux	U _x (m)	0,05453	0,00004	0,05616	0,00125	0,05492	0,0022
	U _y (m)	0,00002	0,05376	0,00124	0,05547	0,00133	0,05432
10 Niveaux	U _x (m)	0,10059	0,00003	0,1031	0,00361	0,10043	0,00222
	U _y (m)	0,00002	0,09535	0,00351	0,09828	0,00002	0,09519

Aussi, les efforts tranchants maximums F_x et F_y , au niveau du rez-de-chaussée, dans les poteaux repérés par C1, C2, C3 sont présentés dans les Tableaux II.3 et II.4 pour les forces sismiques dans les directions de x et de y respectivement.

Tableau II.3. Comparaison Efforts tranchants maximums (direction X)

Bâtiment	Effort tranchant	Dynamique sans excentricité			Dynamique avec excentricité Approche simplifiée			Dynamique avec excentricité : Approche avec déplacement du centre de masse		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
01 Niveau	Fx (kN)	39,31	57,93	73,98	44,17	59,34	75,87	39,81	58,08	74,25
	Fy (kN)	0,09	0,03	0,01	0,72	0,44	0,06	0,14	0,04	0,02
05 Niveaux	Fx (kN)	203,6	218,09	348,16	228,7	240,92	360,36	208,86	223,88	350,57
	Fy (kN)	3,07	1,2	1,68	7,29	1,29	2,28	7,49	1,79	3,92
10 Niveaux	Fx (kN)	341	358,17	485,86	379,85	392,35	503,1	342,26	358,9	485,66
	Fy (kN)	8,49	1,64	1,76	17,28	2,7	5,15	8,41	1,67	1,82

Tableau II.4. Comparaison Efforts tranchants maximums (direction Y)

Bâtiment	Effort tranchant	Dynamique sans excentricité			Dynamique avec excentricité : Approche simplifiée			Dynamique avec excentricité : Approche avec déplacement du centre de masse		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
01 Niveau	Fx (kN)	0,12	0,06	0,02	0,74	0,63	0,1	0,17	0,06	0,03
	Fy (kN)	42,05	49,21	86,35	49	50,5	88,62	43,96	49,4	86,68
05 Niveaux	Fx (kN)	3,43	2,68	1,68	6,99	8,16	2,43	11,31	2,4	5,69
	Fy (kN)	192,2	204,89	375,23	220,51	231,07	388,97	200,08	213,36	378,56
10 Niveaux	Fx (kN)	8,93	1,84	1,98	16,43	2,83	5,32	8,83	1,83	1,98
	Fy (kN)	340,14	363,53	519,7	387,31	407,78	540,86	340,31	363,94	519,08

II.3.3.2. Interprétation des résultats obtenus par les deux approches

Les résultats obtenus par les deux approches détaillée et simplifiée montrent d'une manière générale ce qui suit :

- En ce qui concerne les déplacements nodaux et les efforts tranchants dans les poteaux, que la méthode dynamique simplifiée donne des valeurs plus élevées que la méthode dynamique avec le décalage du centre des masses au niveau de l'analyse modale.
- Pour les déplacements, on note une différence relative en moyenne de 3%.

- Pour les efforts tranchants dans les poteaux, on note une différence relative pouvant aller jusqu'à 13%.
- Les différences les plus élevées se trouvent dans le cas du bâtiment à dix étages. Ceci est dû probablement à l'influence des étages supérieurs sur les centres de masses et de rigidité.
- Les différences ne sont pas significatives, et le choix de la méthode dépendra uniquement des avantages et des inconvénients des deux méthodes.

II.3.4. Avantages et inconvénients des deux approches

L'approche simplifiée de la prise en compte de l'excentricité accidentelle, dans une analyse dynamique, peut être appliquée pour une structure avec planchers rigides et/ou flexibles. Autrement dit, cette méthode est utilisable pour la matrice de masse diagonale ou cohérente. En revanche la méthode détaillée ne peut être utilisée qu'avec la matrice de masse diagonale. Par ailleurs, la méthode simplifiée peut être facilement mise en application dans des outils numériques de calculs de structure (logiciels). En outre cette approche a, en plus, les avantages suivants par rapport à l'approche de déplacement de la matrice des masses :

- Une seule analyse modale est exigée pour tous les cas de torsion d'excentricité.
- Un calcul plus facile de combinaison et d'enveloppe des quatre cas de torsion d'excentricité.
- Elle offre un procédé unifié pour l'excentricité de torsion appliquée à la charge statique équivalente et aux analyses dynamiques modales.

Conclusion

Les codes parasismiques ne donnent aucune méthode pour effectuer le décalage des centres de masses dans l'analyse dynamique. Seules quelques propositions se trouvent dans la littérature. Mais les approches proposées sont critiquables. En effet, le décalage, qui est censé représenter les effets de l'excentricité accidentelle, modifie :

- Les propriétés modales de la structure
- Les ratios d'amortissement modal (méthode de Rayleigh).

Par conséquent, pour pallier ces modifications, des méthodes utilisant des accélérogrammes de torsion ou leur spectre de réponse sont nécessaires.

CHAPITRE III

ESTIMATION DE LA COMPOSANTE SISMIQUE DE ROTATION D'AXE VERTICAL

III.1 Introduction

La réponse sismique des structures a été traditionnellement étudiée seulement par rapport aux mouvements sismiques de translation. Cependant, pour décrire amplement le mouvement d'un corps rigide dans le système cartésien, trois composantes de translation $U(t)$ et trois composantes de rotation $\theta(t)$ sont nécessaires (Figure III.1).

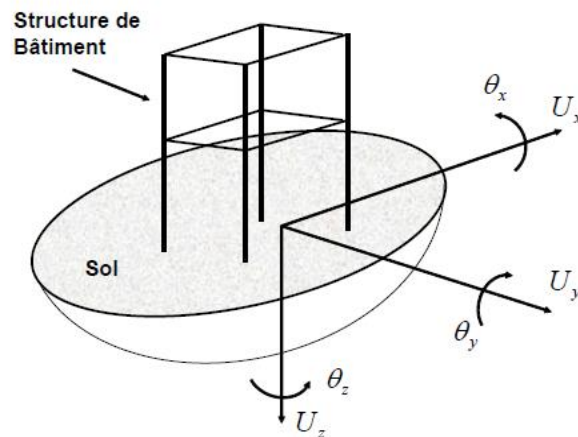


Figure III.1. Effets sismiques sur une structure.

En effet, il a été démontré que l'onde sismique contient non seulement des composantes de translation, mais également trois composantes de rotation autour des trois axes principaux (Newmark, 1969). De surcroît, on a également pu constater durant les séismes passés que les effets des mouvements sismiques de rotation sont clairement visibles (Figures III.1'). A ce sujet, le séisme de L'Aquila en 2009, a produit un nombre impressionnant d'objets verticaux (plusieurs dizaines) ayant subi une rotation d'axe vertical (Hinzen et al., 2013).





Figure III.1'. Rotation d'objets due à la composante sismique de torsion.

III.2. Causes et caractéristiques du mouvement sismique de rotation

Lors d'un séisme, la rupture initiale provoquée au foyer engendre des ondes qui se propagent dans toutes les directions. Les ondes qui se propagent dans la croûte terrestre sont appelées des ondes de volume (Figure III.2') et celles qui se propagent à la surface du sol des ondes de surface.

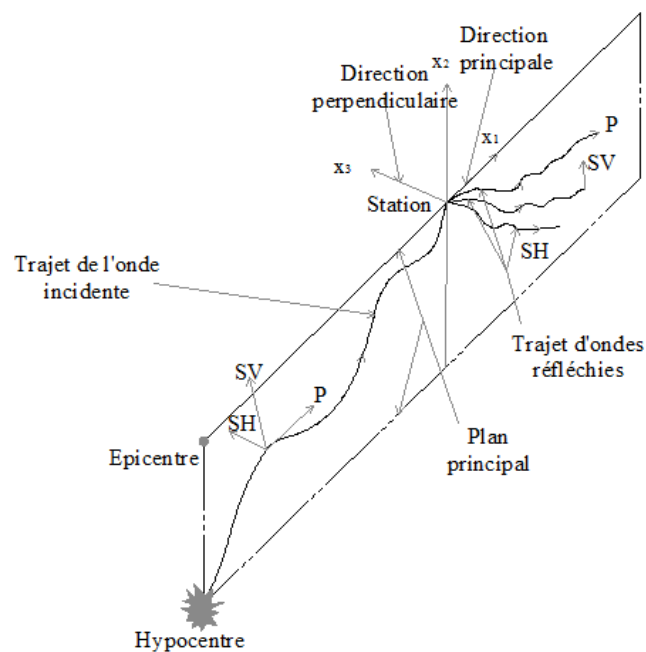


Figure III.2. Propagation des ondes de volume dans le plan principal (incidentes et réfléchies).

On démontre dans la théorie de l'élasticité (Timoshenko, 1961) que dans un matériau homogène et isotrope, il y a deux types d'ondes de volume, c'est-à-dire pouvant se propager dans la masse (Figure III.2') :

- Les ondes longitudinales ou primaires ou ondes P, qui produisent des compressions et des dilatations alternées dans le sens de la propagation, avec changement de volume.
- Les ondes transversales ou secondaires ou ondes S, qui produisent une distorsion (cisaillement) perpendiculaire à la direction de propagation, sans changement de volume.

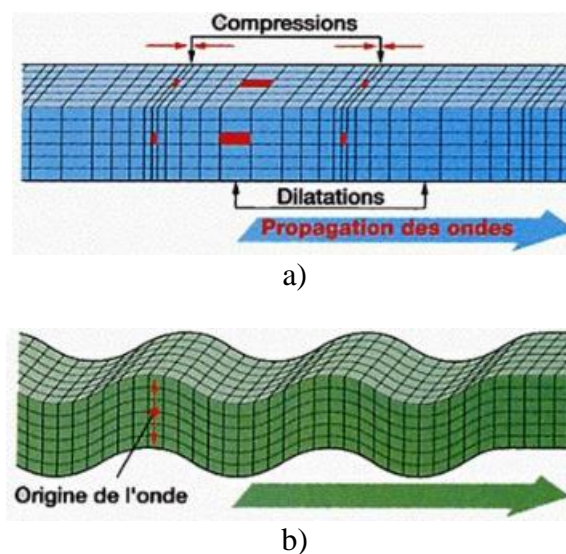


Figure III.2'. Ondes de volume.

- a) Onde longitudinale (onde P)
- b) Onde transversale (onde S)

Les ondes primaires sont généralement à haute fréquence et les premières à atteindre une structure. Les ondes secondaires sont à plus basse fréquence, mais possèdent de plus grandes amplitudes et sont responsables de la plus grande majorité des dommages aux bâtiments (Filiatrault, 1996). Outre les ondes de volumes, les équations de l'élasticité dynamique admettent d'autres solutions, il s'agit des ondes de surface. Il faut savoir que les vibrations émises par la rupture sur le plan de faille sont une combinaison très complexe, d'ondes P et d'ondes S. Quand ces ondes atteignent la surface, une partie de leur énergie peut être convertie en ondes de surface. En génie parasismique, les deux types d'ondes de surface les plus notables sont l'onde de Love et l'onde de Rayleigh (Figure III.3) :

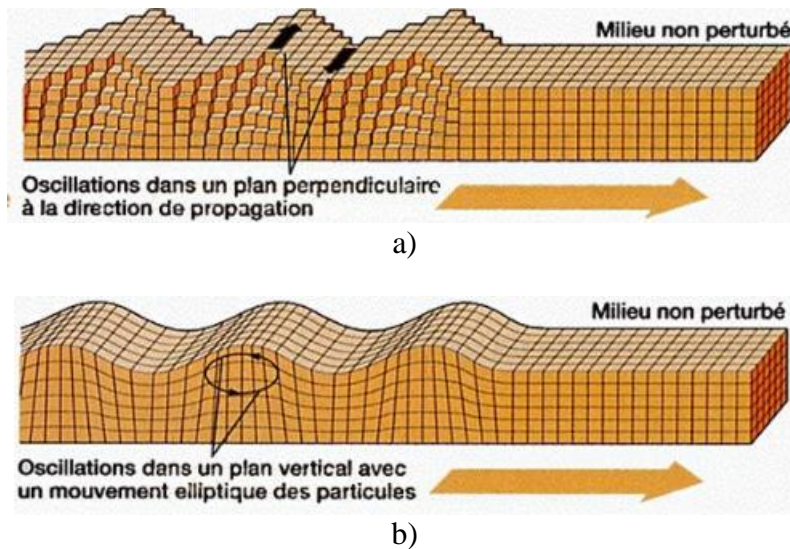


Figure III.3. Ondes de surface.

- a) Onde de love
- b) Onde de Rayleigh

- L'onde de Love est générée par l'interaction entre les ondes S horizontales (SH) et la surface libre du sol. Ainsi, le mouvement des particules résultant est horizontal et perpendiculaire à la direction de propagation, comme l'onde S de volume mais à la différence de celle-ci, son amplitude n'est remarquable que près de la surface et diminue rapidement en profondeur. Elle a un caractère dispersif, c'est-à-dire que sa vitesse de propagation dépend de sa fréquence.
- L'onde de Rayleigh, résulte d'une interaction entre les ondes P, les ondes S verticales (SV) et la surface libre du sol. Elle se déplace parallèlement à la direction de propagation, dont la combinaison produit une trajectoire elliptique, dans le plan vertical. De même que l'onde de Love, l'amplitude du mouvement décroît en profondeur.

Un des résultats de la théorie de la propagation des ondes élastiques est que l'amplitude des mouvements diminue lorsque la distance à l'épicentre augmente. Les lois qui décrivent cette diminution s'appellent les lois d'atténuation. L'amplitude des ondes de volume (primaires et secondaires) se dissipe proportionnellement à $1/R$, où R est la distance de l'hypocentre. Quant à celle des ondes de surface (Rayleigh et Love), elle se dissipe proportionnellement à $1/\sqrt{R}$. Par conséquent, les ondes de surface se propagent sur une plus grande distance.

Les vitesses de propagation des ondes P et S jouent un rôle très important en sismologie et en dynamique des sols, comme en témoignent la détermination des composantes

sismiques de rotation que nous aborderons dans la section suivante. Ces vitesses v_p et v_s , de propagation respectives des ondes P et S, dépendent de la masse volumique ρ des constantes élastiques du milieu (coefficient λ et μ de Lamé, module d'Young E, et coefficient de Poisson ν) par les formules suivantes :

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (\text{III.1})$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (\text{III.2})$$

On s'intéresse généralement à la vitesse v_s des ondes transversales, qui très variable suivant la nature des terrains superficiels. Elle ne dépasse guère 1000 à 1500 m/s pour les rochers à la surface de la terre. Elle est de quelques centaines m/s pour les terrains de bonne qualité (marnes, sables et graviers compacts). Pour les terrains médiocres (sables lâches, argiles molles), elle est entre 100 à 250 m/s ; des valeurs inférieures à 100 m/s peuvent être mesurées dans les vases.

Chacune des ondes sismiques évoquées ci-dessus provoque un mouvement élémentaire particulier comme le montre la figure ci-dessous (Figure III.4).

- Les ondes longitudinales P, à propagation verticale, produisent un mouvement sismique de pompage (composante verticale, ascendante ou descendante).
- Les ondes de cisaillement S, à propagation verticale, produisent un mouvement sismique de tamis (composantes horizontales).
- Les ondes de surface, de Rayleigh, à propagation horizontale, produisent un mouvement de roulis.
- Les ondes de surface, de Love, à propagation horizontale, produisent un mouvement de lacet.

En ce qui nous concerne, ce sont ces dernières qui provoquent la composante verticale de torsion.

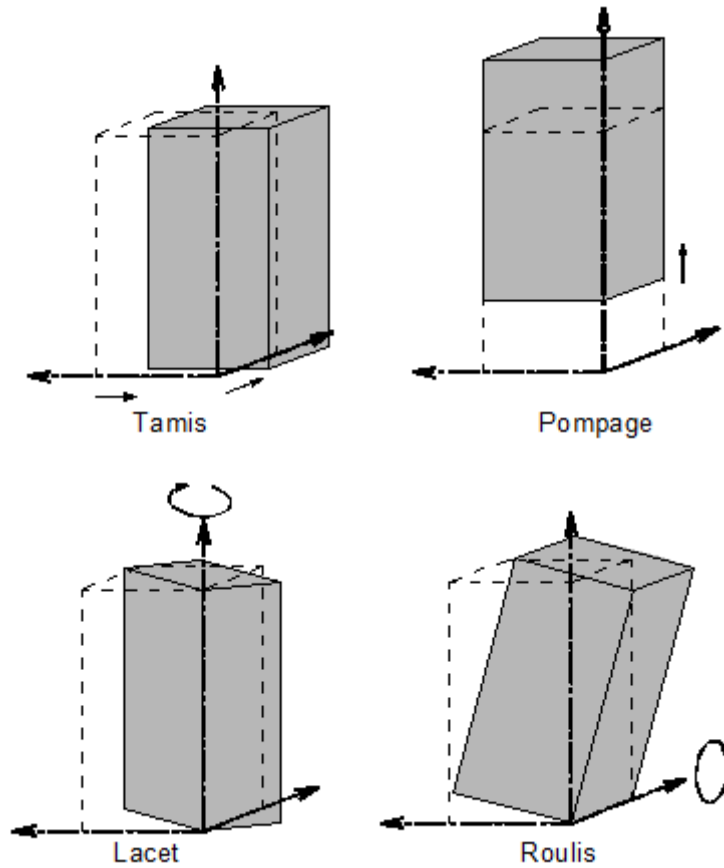


Figure III.4. Mouvements élémentaires d'une structure sous l'action sismique.

III.3. Mesure du mouvement sismique de rotation d'axe vertical

III.3.1. Sismomètres rotatifs pour la mesure indirecte de rotation

Ce type de sismomètre rotatif utilise une paire de capteurs sismiques standards (pendules ou Géophones) orientés parallèlement à un axe choisi (par exemple l'axe X) et montés rigidement à une distance L suivant l'axe perpendiculaire, représenté par l'axe Y de la Figure III.5 (Havskov et Alguacil 2016). La vitesse de rotation Ω_z en radian par seconde (rad/s) autour de l'axe z est donnée par l'équation (III.3) :

$$\Omega_z = \frac{\partial v_x}{\partial v_y} \approx \frac{v_2 - v_1}{L} \quad (\text{III.3})$$

Où v_1 et v_2 sont les vitesses mesurées par les sismomètres 1 et 2.

Rappelons que la vitesse linéaire v d'un point sur un cercle de rayon r (en m), qui a une vitesse angulaire Ω (en rad/s) est donnée par l'équation (III.4) :

$$v = r * \Omega \quad (\text{III.4})$$

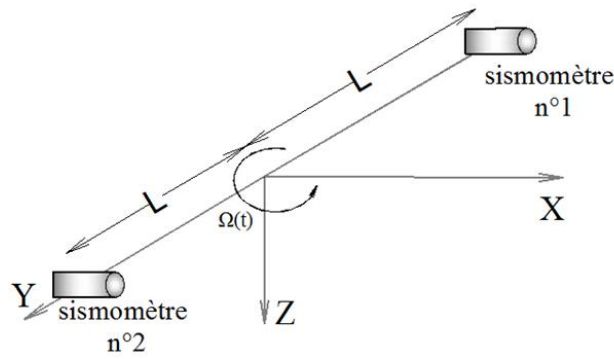


Figure III.5. Principe de mesure indirecte par des sismomètres rotatifs

III.3.1.1. Sismomètre rotatif constitué de sismomètres pendules

Au moins trois types de sismomètre rotatif ont été recensés dans la littérature spécialisée. Il s'agit de Sismomètre rotatif connu sous le nom de « TAPS » (Teisseyre and Nagahama, 1999) : Ce modèle permet de déterminer le déplacement $u(t)$ et la rotation $\Omega(t)$ (Figures (III.6) et (III.7)).

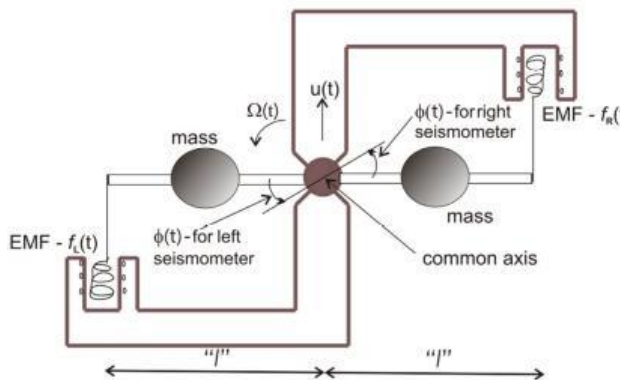


Figure III.6. Sismomètre rotatif, description du modèle TAPS

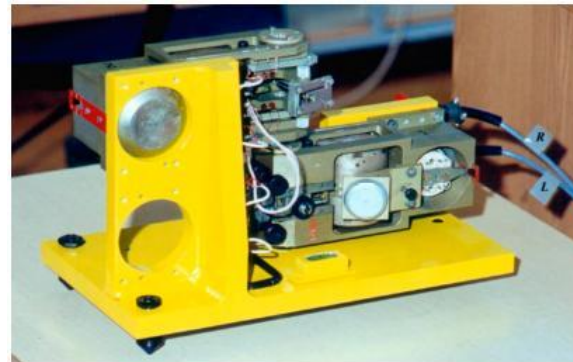


Figure III.7. Sismomètre rotatif, modèle TAPS

III.3.1.2. Sismomètre rotatif utilisant des géophones

Appelé « Rotaphone », ce genre de sismomètre rotatif est constitué de géophones montés sur une base rigide soit horizontalement soit verticalement. Les modèles existants recensés se différencient entre eux par le nombre et la disposition des géophones, pour obtenir une meilleure précision des résultats escomptés, notamment les rotations. Trois prototypes ont été recensés dans la littérature spécialisée :

- a) Prototype I (3 DOF) : ce modèle permet de déterminer les trois degrés de liberté v_x , v_y et Ω_z . Il est constitué de 10 géophones (quatre verticaux et six horizontaux) monté autour d'un disque métallique de diamètre 0,25 m et espacé régulièrement, comme le montre les Figures III.8 et III.9 (Brokešová et al., 2009).

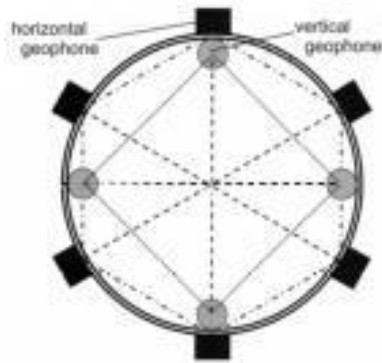


Figure III.8. Sismomètre rotatif, description du modèle Rotaphone 3D.



Figure III.9. Sismomètre rotatif, Rotaphone 3D.

- b) Prototype II (6 DOF) : Ce modèle contient 12 géophones. Plus précis que le précédent il permet de déterminer les six degrés de liberté : v_x , v_y , v_x , Ω_y , Ω_z et Ω_z . (voir Figures III.10 et III.11).

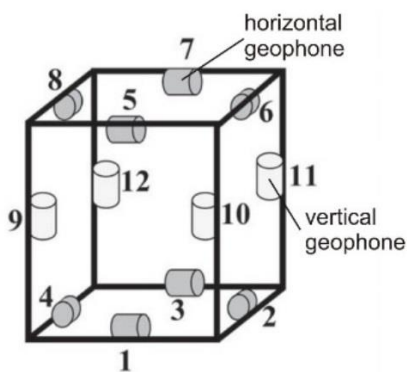


Figure III.10. Sismomètre rotatif, description du modèle Rotaphone 6D.

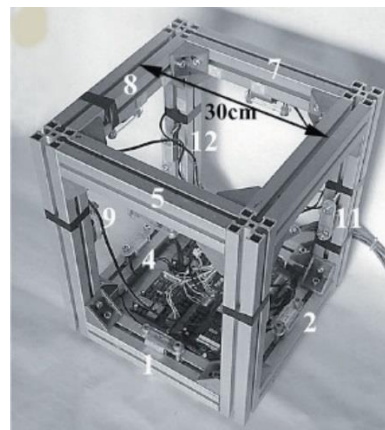


Figure III.11. Sismomètre rotatif, Rotaphone 6D.

- c) Prototype III (D) : Ce modèle contient 16 géophones, il permet de déterminer les six degrés de liberté : v_x , v_y , v_x , Ω_y , Ω_z et Ω_z . (voir Figures III.12 et III.13).

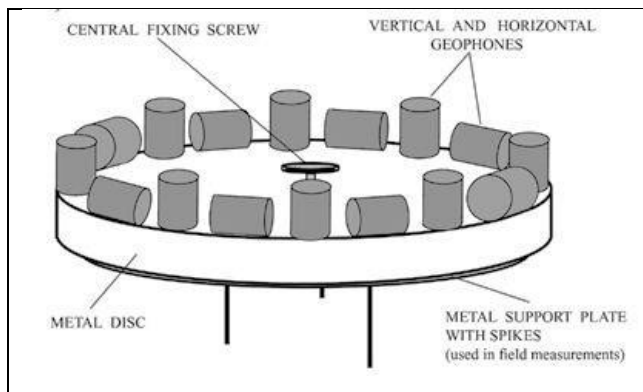


Figure III.12. Sismomètre rotatif, description du modèle Rotaphone D.



Figure III.13. Sismomètre rotatif, modèle Rotaphone D.

III.2. Sismomètres rotatifs pour la mesure directe de la rotation

La mesure directe de la rotation est extrêmement difficile en raison de la sensibilité souhaitée sur une large bande de fréquences. En général, il existe trois technologies différentes qui s'efforcent de construire ce type de sismomètre : mécanique, électrochimique et optique (Havskov et Alguacil 2016).

Actuellement, la technologie de pointe pour mesurer l'excitation rotationnelle, ce sont les capteurs de rotation en anneau-laser (Figure III.14) et gyroscope en fibre optique, capteur de position angulaire et de vitesse angulaire (Figure III.15) (Kurzych et al., 2014).



Figure III.14. Sismomètre rotatif, en anneau laser installé horizontalement



Figure III.15. Sismomètre rotatif, gyroscope en fibre optique

Ces sismomètres de mesure directe de la rotation ont donné de bons résultats, en mesurant récemment des séismes moyens et forts. Mais leur utilisation, à grande échelle, dans le domaine

de l'ingénierie sismique n'est pas encore au rendez-vous : ils sont très coûteux à fabriquer et difficiles à mettre en place. Par conséquent, les ingénieurs en structures devraient se contenter, pour le moment, des méthodes approchées analytiques pour disposer d'accélérogrammes de rotation.

III.4. Détermination analytique du mouvement sismique de torsion

Les mouvements sismiques sont considérés comme le résultat de l'arrivée des ondes planes harmoniques à la surface de la terre. La direction de propagation est assumée être, en l'occurrence, dans le plan vertical d'axes X et Z. les ondes de volumes SH génèrent deux composantes sismiques à la surface de la terre : composante de torsion (rotation d'axe vertical) et une composante de rotation d'axe horizontal (basculement).

D'une manière générale, trois méthodes sont disponibles pour générer ces deux composantes.

III.4.1. Première Méthode

Cette dernière a déterminé une relation en utilisant les composantes horizontales de translation enregistrées u, v et celle verticale w. Ces déplacements de translation temporels sont décomposés dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformation de Fourier. Pour chaque onde harmonique, les relations suivantes sont utilisées pour déterminer l'angle d'incidence θ_0 :

$$\frac{w}{u} = \frac{2\sin\theta_0\sqrt{1-\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2(\sin\theta_0)^2}}{\frac{v_p}{v_s}(1-2(\sin\theta_0)^2)}, \text{ si } \theta_0 < \theta_c \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{w}{u} = \frac{2\sin\theta_0\sqrt{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2(\sin\theta_0)^2}}{i\frac{v_p}{v_s}(1-2(\sin\theta_0)^2)}, \text{ si } \theta_0 > \theta_c \quad (\text{III.6})$$

v_p et v_s sont les vitesses respectives des ondes P et S.

L'angle d'incidence critique est donné par l'équation (III.7)

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{v_s}{v_p}\right) \quad (\text{III.7})$$

Pour une onde incidente ayant une fréquence ω , la fonction du déplacement est donnée par :

$$D(x, z, t) = A \exp i\omega \left(t - \frac{\sin\theta_0}{v_s} x + \frac{\cos\theta_0}{v_s} z \right) \quad (\text{III.8})$$

La composante du déplacement suivant Y perpendiculaire au plan de propagation est :

$$v=2 D \quad (\text{III.9})$$

A partir de la théorie de la propagation des ondes élastiques et on peut définir la composante de rotation comme suit :

$$\theta_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial u} \Big|_{z=0} \quad (\text{III.10})$$

En utilisant l'angle d'incidence calculé, et en substituant les équations (III.8) et (III.9) dans l'équation (III.10), on obtient la composante de rotation d'axe vertical pour une fréquence donnée :

$$\theta_z = i\omega \frac{\sin\theta_0}{v_s} \frac{v}{2} \quad (\text{III.11})$$

A partir de l'équation (III.11), le spectre de Fourier de la composante de torsion peut être obtenu. Par conséquent, la composante sismique de torsion peut également être déduite en utilisant l'inverse de la transformation de Fourier.

III.4.2. Deuxième Méthode

Les accélérogrammes de translation sont enregistrés suivant les deux directions horizontales x et y. On se base sur l'hypothèse que le mouvement sismique est la superposition de deux propagations, indépendantes, d'ondes planes non dispersif, suivant deux directions principales (X' et Y'). Les déplacements du sol dans les directions X' et Y', avec v_s la vitesse de cisaillement, sont :

$$u_{X'}(t) = g(Y' - v_s \cdot t) \quad (\text{III.12})$$

$$u_{Y'}(t) = f(X' - v_s \cdot t) \quad (\text{III.13})$$

Si la forme de l'onde ne change pas et reste constante, la dérivation spatiale peut être remplacée par une dérivation par rapport au temps divisée par la vitesse de cisaillement v_s .

La rotation d'axe vertical se définit comme suit :

$$\theta(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{Y'}}{\partial X'} - \frac{\partial u_{X'}}{\partial Y'} \right) \quad (\text{III.14})$$

Les déplacements du sol, $u_{X'}$ et $u_{Y'}$, suivant les deux directions principales (X' et Y') font un angle (δ) avec les axes d'enregistrement X et Y (Figure III.16).

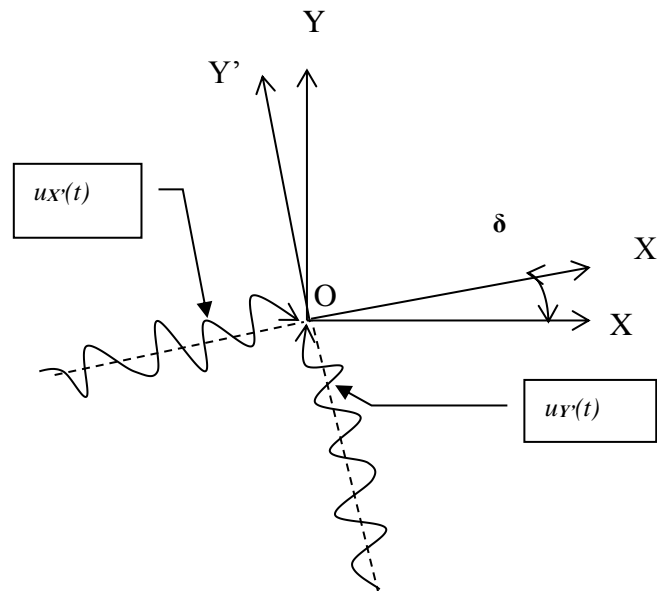


Figure III.16. Directions de propagation des ondes sismiques.

Ainsi, ces deux déplacements peuvent s'écrire (Enache et al., 2010) :

$$u_{X'}(t) = u_X(t) \cos \delta + u_Y(t) \sin \delta \quad (\text{III.15a})$$

$$u_{Y'}(t) = -u_X(t) \sin \delta + u_Y(t) \cos \delta \quad (\text{III.15b})$$

Par ailleurs, en résolvant l'équation différentielle des ondes, on trouve que les déplacements, u_X et u_Y , dépendent de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement v_s . Ainsi, si on suppose que la forme de l'onde est invariable, l'équation (III.14) peut être remplacée par des dérivées par rapport au temps :

$$\theta(t) = \frac{1}{2v_s} [\dot{u}_X(t) - \dot{u}_Y(t)] \quad (\text{III.16})$$

En substituant l'équation (III.15) dans (III.16), on obtient l'équation du déplacement angulaire de la composante sismique de torsion :

$$\theta(t) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot v_s} \left[\dot{u}_x(t) \cos\left(\delta - \frac{\pi}{4}\right) + \dot{u}_y(t) \sin\left(\delta - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (\text{III.17})$$

A partir de l'équation (III.17), on peut trouver aisément la vitesse et l'accélération angulaires :

$$\dot{\theta}(t) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot v_s} \left[\ddot{u}_x(t) \cos\left(\delta - \frac{\pi}{4}\right) + \ddot{u}_y(t) \sin\left(\delta - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (\text{III.18})$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot v_s} \left[\dddot{u}_x(t) \cos\left(\delta - \frac{\pi}{4}\right) + \dddot{u}_y(t) \sin\left(\delta - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (\text{III.19})$$

III.4.2.1. Principe de la dérivation numérique de l'accélération sismique de translation

Lorsqu'on parle de dérivation numérique, c'est qu'on cherche à évaluer une fonction $f(x)$ connue seulement en quelques points, en l'occurrence l'accélération sismique angulaire. Le problème consiste à obtenir des approximations des différentes dérivées de cette fonction. On doit alors effectuer la dérivée des accélérogrammes enregistrés avec des pas de temps constants.

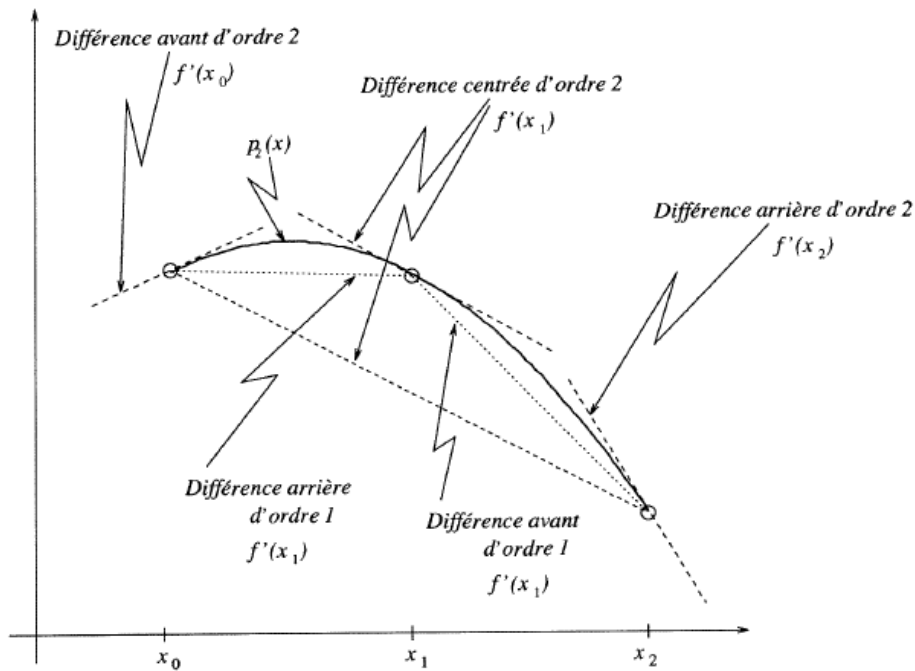


Figure III.17. Interprétation géométrique des formules aux différences

La Figure III.17. illustre les différentes possibilités. Pour les différences d'ordre 1, on estime la dérivée par la pente du segment de droite joignant les points $(x_0, f(x_0))$ et $(x_1, f(x_1))$. Dans le cas des différences d'ordre 2, on détermine un polynôme de degré 2 dont la pente en x_0 , en x_1 et en x_2 donne respectivement les différences avant, centrée et arrière.

III.4.3. Troisième Méthode

Le séisme est considéré, en l'occurrence, comme étant généré par des ondes planes harmoniques. La direction de propagation est assumée être contenue dans un plan vertical X-Z (Figure III.18).

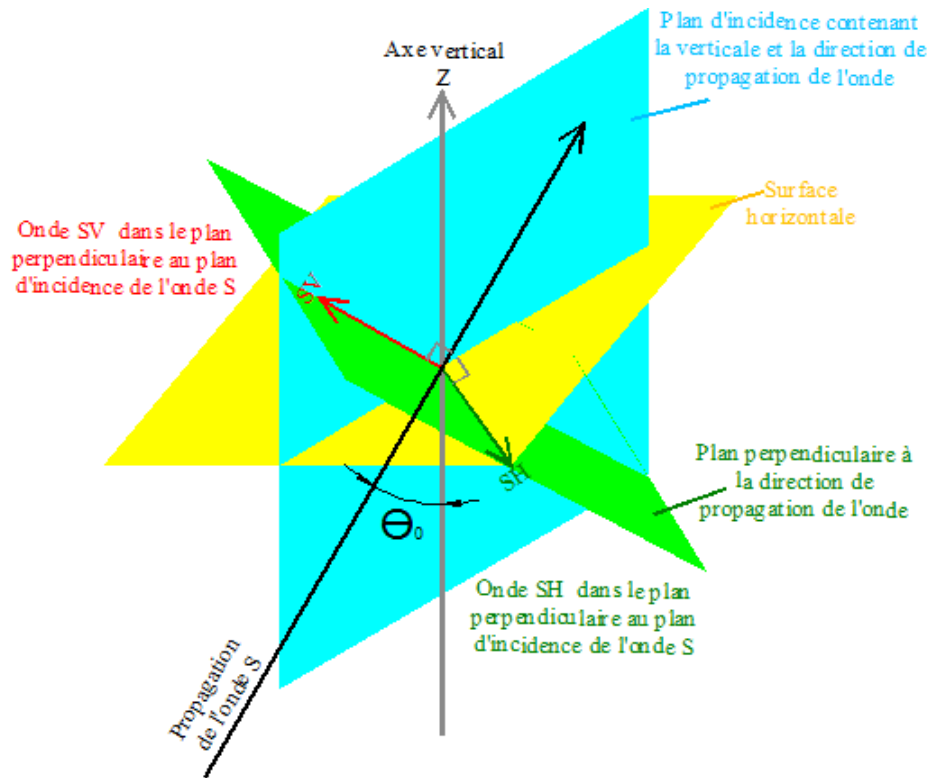


Figure III.18. Propagation d'une onde S incidente

En arrivant à la surface libre, l'onde de cisaillement, SH, va se réfléchir en une nouvelle onde SH, avec un angle de réflexion θ_2 égal à l'angle d'incidence θ_0 (Figure III.19). Par conséquent, ce phénomène va produire la composante sismique de torsion.

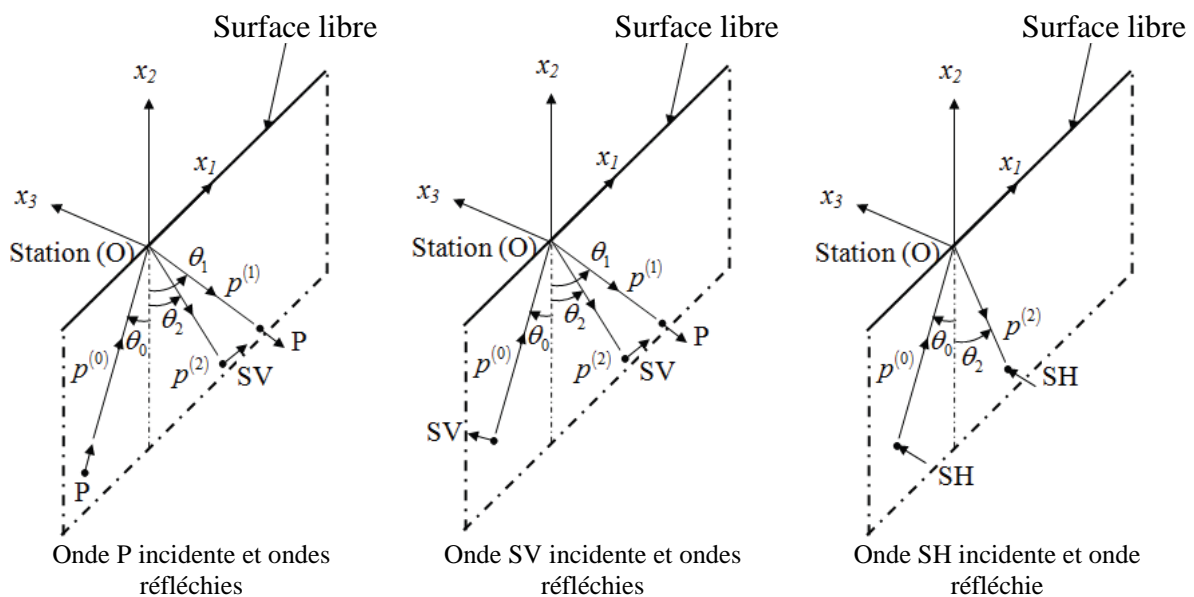


Figure III.19. Détail de propagation des ondes à partir de l'hypocentre vers la station d'enregistrement dans le plan principal et réflexion des ondes incidentes à partir de la surface libre (Source : Basu, 2012)

4.3.1. Procédure d'estimation de la composante sismique de torsion

Cette deuxième méthode (Lee et Trifunac, 1985) permettant l'extraction d'accélérogrammes à partir de ceux de translation est la plus utilisée par les ingénieurs et chercheurs travaillant dans le domaine du parasismique. (Nazarov et all, 2015).

En appliquant la théorie des ondes planes élastiques (Lee et Trifunac, 1985), la relation entre la composante sismique de torsion φ_{gz} et celles de translation horizontales peut être obtenue par l'équation suivante :

$$\varphi_{gz} = \left(\frac{i\omega \sin \theta_0}{2\beta} v \right) e^{-i\pi/2} = \left(\frac{i\omega}{2C_x} v \right) e^{-i\pi/2} \quad (\text{III.20})$$

Où ω : est la fréquence de l'onde harmonique.

β : est la vitesse de l'onde de cisaillement.

v : est la composante sismique de translation dans la direction perpendiculaire au plan de l'onde incidente.

$C_x = \beta / \sin \theta_0$: est la vitesse de phase dans la direction horizontale.

Lee and Trifunac [21] font l'hypothèse que l'angle d'incidence de l'onde SH est constant. Ainsi, θ_0 , angle d'incidence, est égal à θ_c , angle critique d'incidence, qui vaut $\sin^{-1}(\beta/\alpha)$. Alors, le ratio des amplitudes de φ_{gz} et de V peut s'écrire :

$$\frac{\varphi_{gz}}{V} = \frac{\omega}{2C_x} \quad (\text{III.21})$$

Vers la fin des hautes fréquences, les vitesses de phase de tous les modes des ondes de surfaces tendent vers la valeur β_{\min} . Ainsi :

$$\frac{|\varphi_{gz}(\omega_n)|}{|V(\omega_n)|} = \frac{\omega_n}{2\beta_{\min}}, \text{ lorsque } \omega_n \rightarrow \infty \quad (\text{III.22})$$

Vers la fin des basses fréquences, seulement le premier mode est présent et sa vitesse de phase tend vers β_{\max} . Le ratio vaut donc :

$$\frac{|\varphi_{gz}(\omega_n)|}{|V(\omega_n)|} = \frac{\omega_n}{2\beta_{\max}}, \text{ lorsque } \omega_n \rightarrow 0 \quad (\text{III.23})$$

La valeur du ratio $|\varphi_{gz}(\omega_n)|/|V(\omega_n)|$ peut être obtenue en appliquant une approximation linéaire, comme le montre la Figure III.20 (Lee et Trifunac, 1985). Par conséquent, la valeur du ratio est obtenue pour chaque valeur de ω_n . Et à la fin, l'inverse de la transformée de Fourier rapide (FFT) du spectre $|\varphi_{gz}(\omega_n)|$ permet d'obtenir l'accélérogramme de torsion recherché.

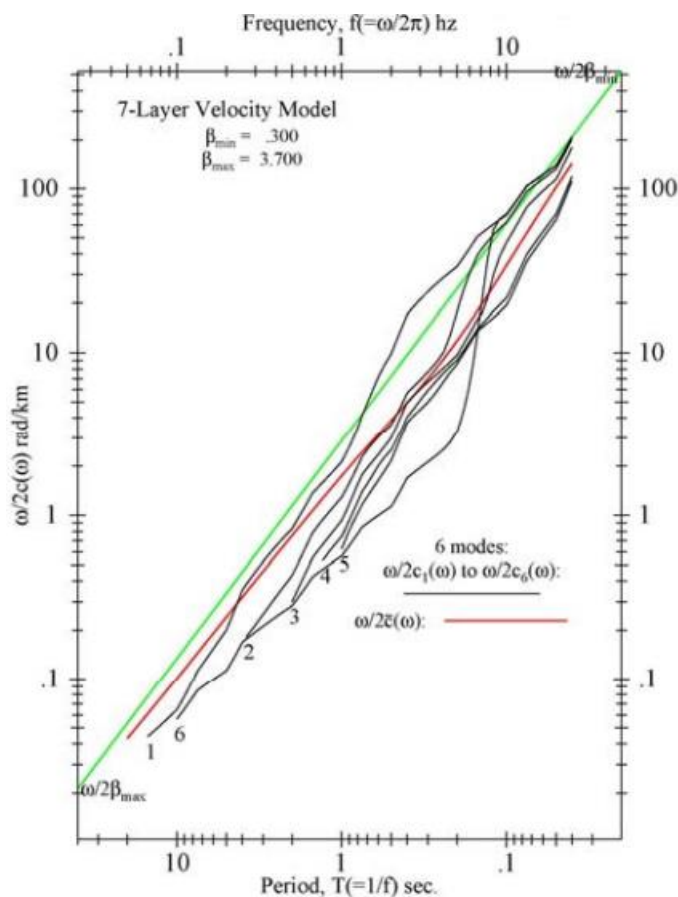


Figure III.20. Le ratio $\frac{\omega}{2C_x}$ de l'onde de Love en fonction de la fréquence (Lee et Trifunac, 1985)

Conclusion :

L'utilisation, à grande échelle, de sismomètres de rotation dans le domaine de l'ingénierie sismique n'est pas à l'ordre du jour. Car seuls des prototypes, très coûteux à fabriquer et difficiles à mettre en place, existent. Par conséquent, les ingénieurs en structures devraient se contenter, pour le moment, des méthodes approchées analytiques pour disposer d'accélérogrammes de rotation. Malheureusement, les codes de calculs commerciaux n'offrent pas la possibilité, aux professionnels et chercheurs, de construire des accélérogrammes de rotation et de faire des calculs dynamiques avec ces composantes sismiques de rotation.

CHAPITRE IV

EFFETS DE LA ROTATION SISMIQUE D'AXE VERTICAL SUR LA REPONSE STRUCTURALE NON-LINEAIRE

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse d'effet du mouvement de la rotation sismique d'axe vertical sur la réponse structurale non-linéaire. Autrement dit, il s'agit d'estimer l'ordre de grandeur de la torsion accidentelle due à la composante sismique de torsion.

IV.1. Modélisation des structures types analysées

Dans cette étude, on étudie deux structures en béton armé composée de quatre niveaux, l'une régulière et symétrique (Figure IV.1) et l'autre asymétrique et irrégulière (Figure IV.2). La hauteur des étages est de trois mètres. Le système structural est constitué de portiques, avec un plancher infiniment rigide dans son plan. Le dimensionnement, selon les Règles Parasismiques Algériennes (RPA 99, modifiées 2003), des poutres et poteaux est présenté dans les Figures IV.3 et IV.4.

Figure IV.1. Configuration en 3D de la structure régulière étudiée.

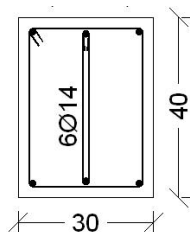


Figure IV.3. Coupe transversale d'une poutre type en béton armé.

Figure IV.2. Configuration en 3D de la structure irrégulière étudiée.

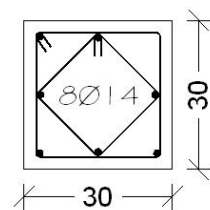


Figure IV.4. Coupe transversale d'un poteau type en béton armé.

Puisque la finalité de cette analyse porte sur la réponse globale de la structure, les hypothèses pour construire son modèle spatial en éléments finis ont consisté à modéliser les poteaux et les poutres par des éléments barres et le diaphragme par un élément coque.

Par ailleurs, la non-linéarité est incontournable pour une évaluation fiable de la réponse sismique d'une structure. Pour ce faire, nous avons opté pour une approche qui peut être qualifiée de semi-globale, pour décrire le comportement des éléments poteaux et poutres de la structure. En d'autres termes, nous avons choisi l'élément barre en trois dimensions (3D). Il s'agit d'une barre ayant une section transversale composée de fibres avec des matériaux béton et acier non-linéaires (Figure IV.5). Une liaison parfaite est assumée entre les fibres. Ainsi, pour chaque élément fini une certaine section transversale avec des fibres de différents matériaux peut être définie. Les forces résultantes d'une section transversale sont le résultat de la contribution de la force au niveau de chaque fibre. La modélisation par des éléments barres 3D se caractérise par une souplesse de mise en œuvre et engendre un coût de calcul réduit, contrairement aux modèles locaux, utilisant des éléments finis volumes 3D, qui s'attardent à décrire finement le comportement des matériaux. Mais, la lourdeur de leurs calculs empêche souvent l'étude de structures complètes.

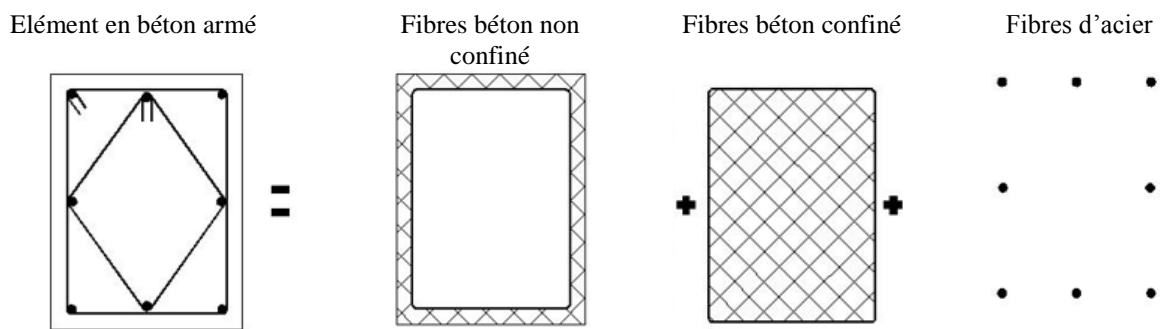


Figure IV.5. Section transversale de l'élément barre en 3D.

Concernant le comportement non-linéaire de l'élément barre utilisé, le modèle de Mander et al. (Mander et al., 1988) a été retenu pour le béton confiné et la loi du béton ordinaire pour le béton non confiné (Figure IV.6) et le modèle bilinéaire élasto-plastique pour l'acier (Figure IV.7).

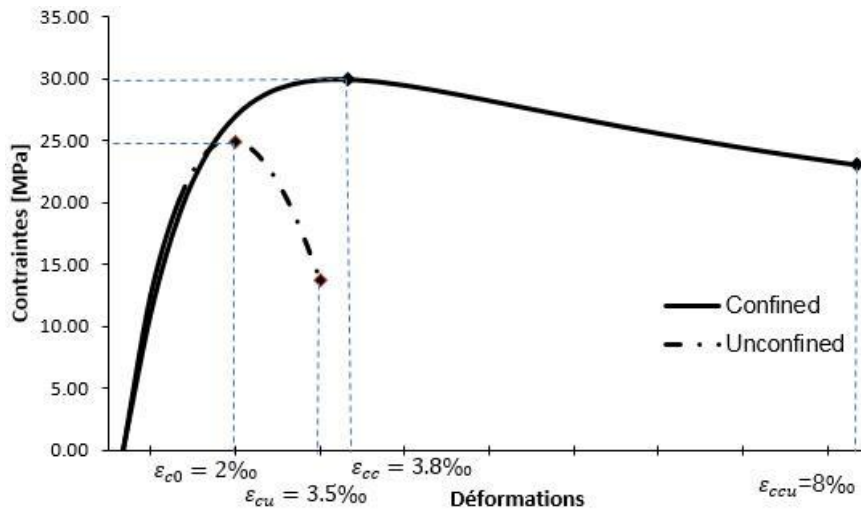


Figure IV.6. Lois de comportement béton utilisées.

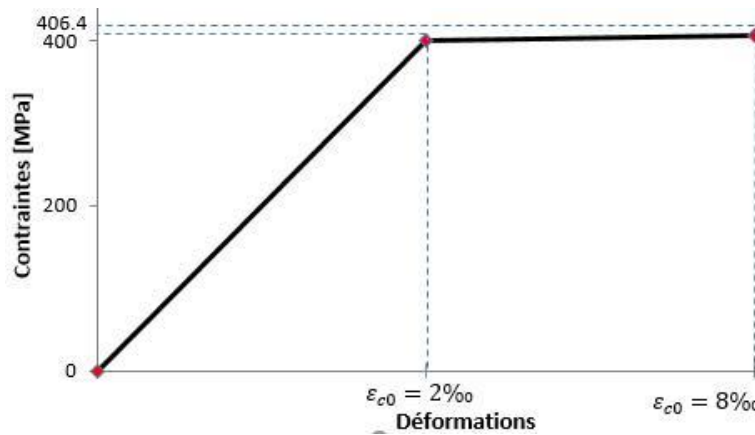


Figure IV.7. Loi de comportement acier utilisée

La comparaison de la modélisation de l'élément barre 3D retenu donne une concordance avec la loi de comportement « moment-courbure » de la même section calculée avec un logiciel commercial, comme le montre la Figure IV.8. (Mistler et Valls, 2004).

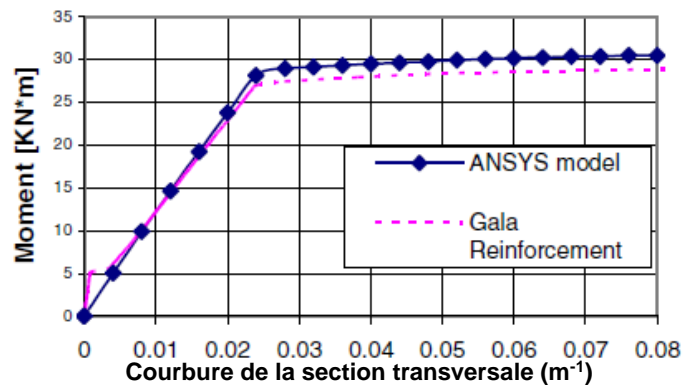


Figure IV.8. Comparaison de loi de comportement contrainte-déformation du modèle utilisé et celle du moment-courbure d'un logiciel commercial

IV.2. Caractéristiques des composantes sismiques utilisées

En raison de la complexité des mouvements sismiques du sol, il est impossible de caractériser ces derniers en vue d'une conception de bâtiments par exemple avec les seuls accélérogrammes enregistrés. Quelques indicateurs sont nécessaires pour décrire divers aspects des mouvements sismiques du sol. A cet égard, l'indicateur dit de « pic », le maximum d'accélération, en anglais Peak of Ground Acceleration (PGA), est un des paramètres de mouvement du sol les plus utilisés dans le champ du risque sismique, mais il est souvent considéré comme un indicateur peu approprié vis-à-vis du pouvoir destructeur. Les mouvements du sol avec des accélérations maximales sont généralement, mais pas toujours, plus destructeurs que ceux avec des accélérations maximales faibles. Par exemple, les accélérations maximales très élevées de très courte durée peuvent ne causer aucun dommage significatif aux structures qui n'ont même le temps de réagir à cette excitation. Bien que l'accélération maximale soit un indicateur utile, les forces d'inertie en dépendent, elle doit être complétée par des indicateurs supplémentaires pour caractériser un mouvement du sol avec précision. Pour le travail qui nous intéresse, des indicateurs supplémentaires ont été retenus à l'instar du contenu fréquentiel, la distance épiscopentrale, la vitesse de l'onde de cisaillement.

IV.2.1. Distance épiscopentrale

Dans la plupart des cas, les effets de la composante sismique de rotation ont été observés dans des zones très proches de l'épicentre, distances épiscopentrals inférieures à quinze kilomètres. A titre d'exemple, durant le tremblement de terre de L'Aquila (Italie), en 2009, la majorité absolue des effets du mouvement sismique de torsion a été observée dans la zone épiscopentrale et dont la magnitude du séisme est supérieure à 7 (Hinzen et al., 2013).

IV.2.2. Contenu fréquentiel

Le contenu fréquentiel, c'est-à-dire la distribution de l'énergie en fonction des fréquences, d'un accélérogramme est représenté par le spectre de Fourier. La transformée de Fourier d'un accélérogramme $\ddot{x}(t)$ est donnée par l'équation (IV.1) :

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{x}(t) e^{-i\omega t} dt \quad (\text{IV.1})$$

L'équation (IV.2), pour t appartenant à un intervalle $[0, T]$, peut s'écrire comme suit :

$$X(\omega) = \int_0^T \ddot{x}(t) \cos(\omega t) dt - i \int_0^T \ddot{x}(t) \sin(\omega t) dt \quad (\text{IV.2})$$

En utilisant l'équation (IV.2), on peut déterminer les spectres de Fourier (équation IV.3) et de phase (équation IV.4) :

$$|X(\omega)| = \sqrt{\left[\int_0^T \ddot{x}(t) \cos(\omega t) dt \right]^2 + \left[\int_0^T \ddot{x}(t) \sin(\omega t) dt \right]^2} \quad (\text{IV.3})$$

$$\phi(\omega) = -\tan^{-1} \left\{ \frac{\int_0^T \ddot{x}(t) \sin(\omega t) dt}{\int_0^T \ddot{x}(t) \cos(\omega t) dt} \right\} \quad (\text{IV.4})$$

Bien que le spectre de phase soit considéré comme étant de moindre importance que celui de l'amplitude, les deux spectres sont nécessaires pour définir un accélérogramme. En effet, il convient de rappeler que les caractéristiques non-stationnaires d'un accélérogramme sont décrits par son spectre de phase. Par ailleurs, les spectres d'amplitude de Fourier de vitesse et de déplacement peuvent être obtenus en divisant l'accélération et le spectre d'amplitude de Fourier par la fréquence et le carré de la fréquence, respectivement.

Le spectre d'amplitude de Fourier peut être étroit ou large. Un spectre étroit implique que le mouvement a une fréquence dominante. Autrement dit, ce mouvement est représenté par une fonction du temps qui est presque sinusoïdale. Un large spectre quant à lui contient une large bande de fréquences dominantes, qui correspond à une fonction du temps très irrégulière et aléatoire.

Le spectre de puissance est une représentation alternative du contenu fréquentiel d'un accélérogramme. Il est étroitement lié au spectre d'amplitude de Fourier comme le l'équation (IV.5) :

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi T} [|X(\omega)|^2] \quad (\text{IV.5})$$

Où $S(\omega)$: spectre de puissance,
 $|X(\omega)|$: spectre d'amplitude de Fourier,

T : durée de l'accélérogramme.

IV.3. Génération de l'accélération angulaire de la composante de torsion

La liste des accélérogrammes sélectionnés, à partir la base des données « PEER Strong Motion Database », est présentée dans le tableau IV.1. ci-dessous. Ces accélérogrammes disposent d'un large contenu fréquentiel et se situent dans la zone épacentrale.

En appliquant la première méthode (voir le sous-titre III.4.1), les accélérogrammes de torsion sont obtenus à partir de trois accélérogrammes de translation présentés dans le Tableau IV.1.

En effet, l'accélérogramme de torsion est obtenu en utilisant l'équation (III.19), qui revient, somme toute, à dériver par rapport au temps, numériquement, deux accélérogrammes enregistrés dans deux directions orthogonales par une station (Figures IV.9, IV.10 et IV.11). La détermination de l'angle δ correspond à la valeur nulle du coefficient de corrélation pour chaque couple de déplacements calculés u_X et u_Y , suivant donc les directions principales indépendantes maximum et minimum (Figure III.16).

Tableau IV.1. Caractéristiques des séismes sélectionnés

Séisme	Station	Mw	Distance épacentrale (kms)	PGA (g)	Vitesse des ondes de cisaillement (m/s)
Vrancea Roumanie (04/03/1977)	Bucharest, INCERC	7.2	10	0.21	300
Petrolia USA (25/04/1992)	CSMIP St n°89156	7.1	05	0.65	713
Christ-church New Zealand (21/02/2011)	Lyttelton Port Company	6.3	04	0.86	422

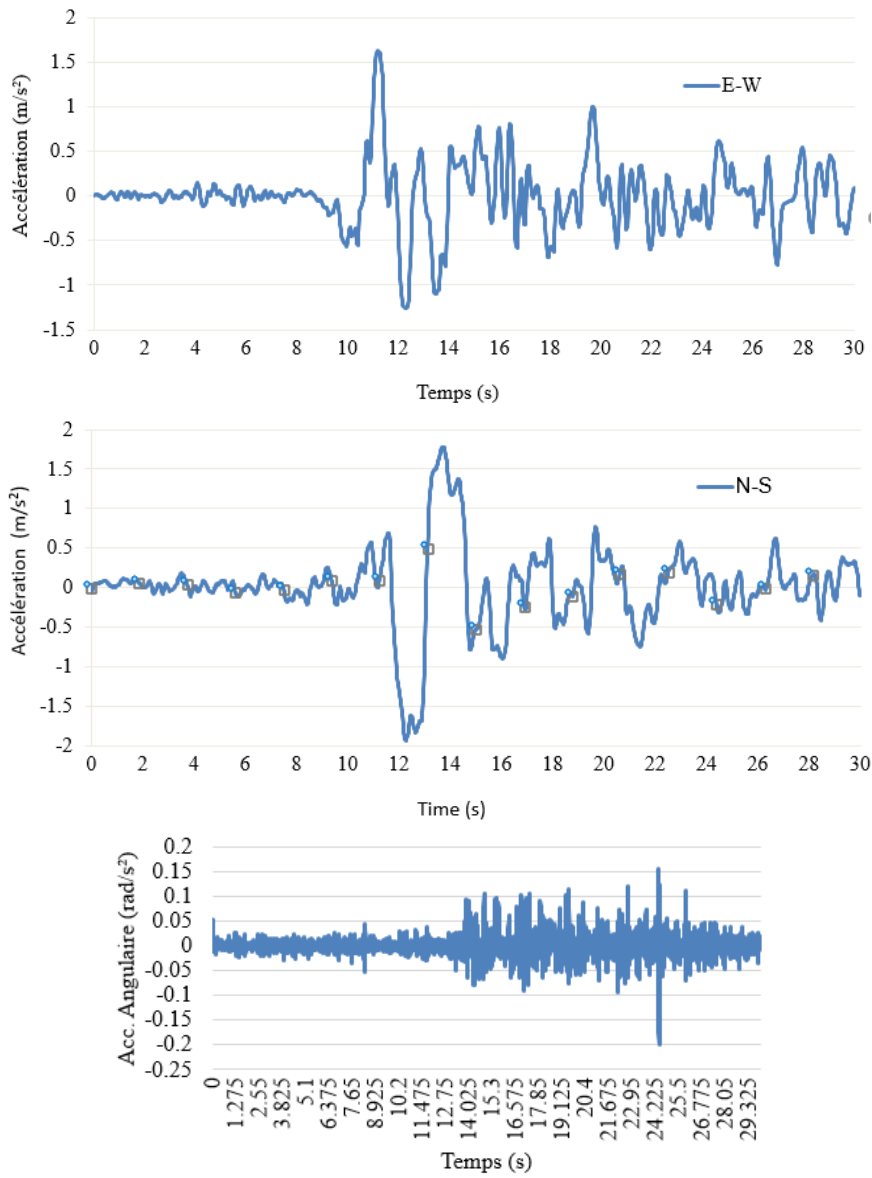
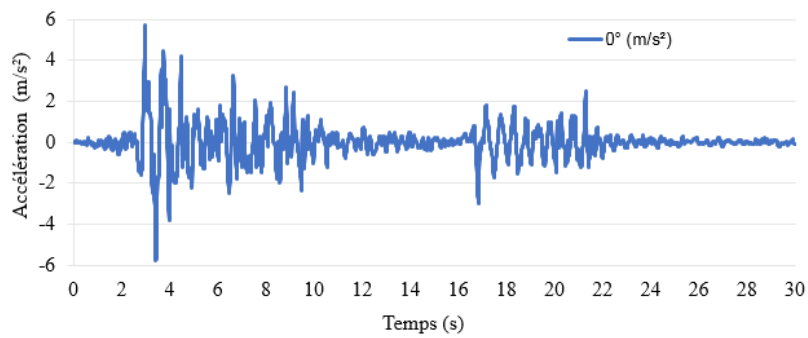


Figure IV.9. Accélérogrammes de translation et de torsion du séisme de Vrancea (1977, Bucharest, INCERC)



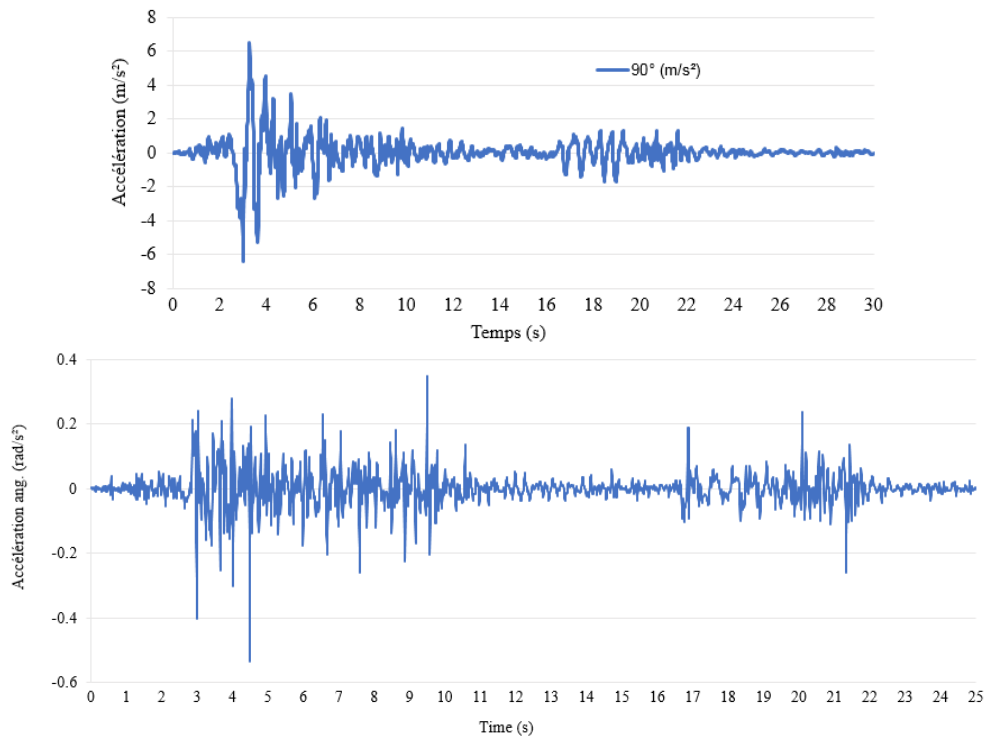
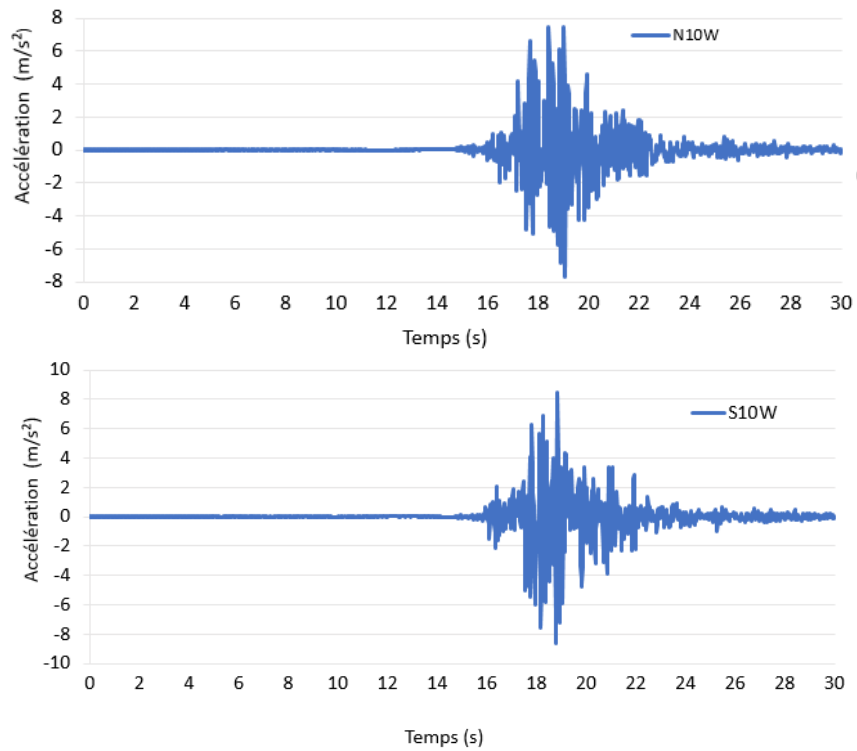


Figure IV.10. Accélérogrammes de translation et de torsion du séisme de Petrolia



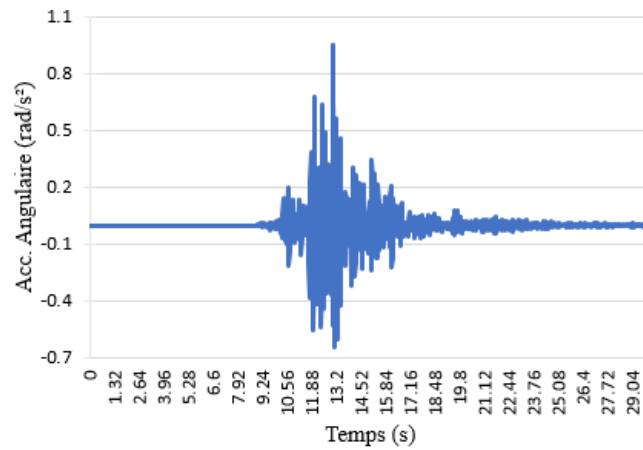


Figure IV.11. Accélérogrammes de translation et de torsion du séisme de Christchurch

Les spectres de puissance de l'accélération de torsion et des accélérations horizontales des séismes utilisés sont montrés ci-dessous (Figures IV.12, IV.13 et IV.14). Nous remarquons que le contenu fréquentiel de l'accélération de torsion est plus riche que celui des accélérations horizontales, notamment pour les hautes fréquences.

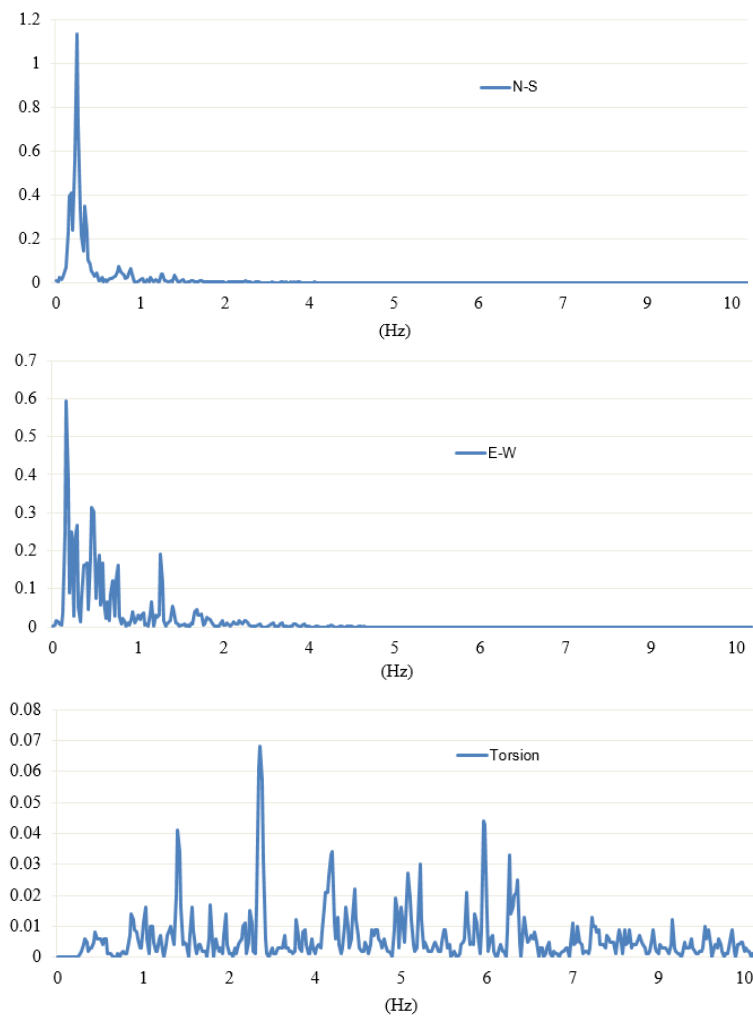


Figure IV.12. Spectre de puissance des accélérations de translation et de torsion du séisme de Vrancea

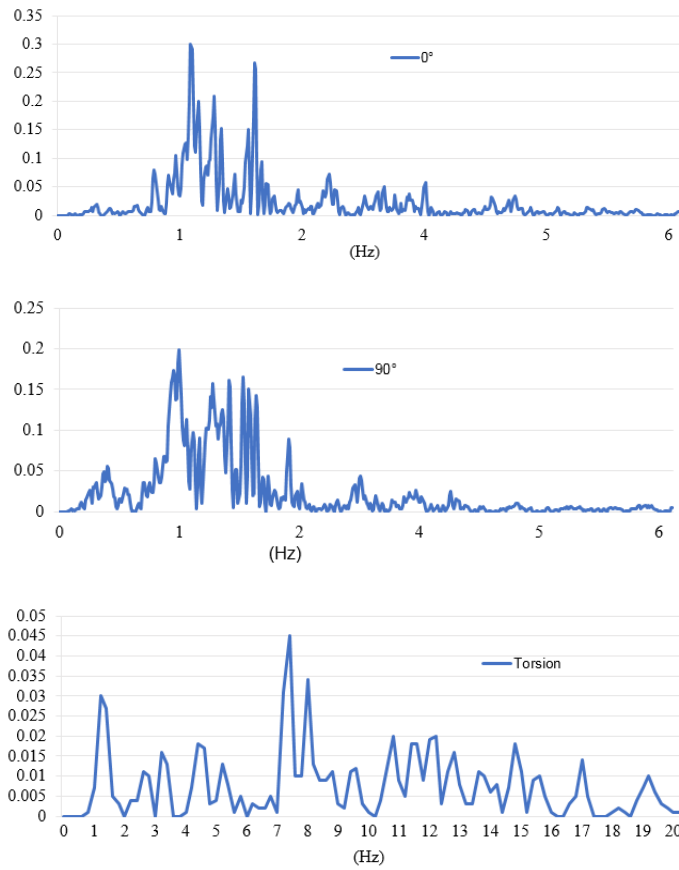
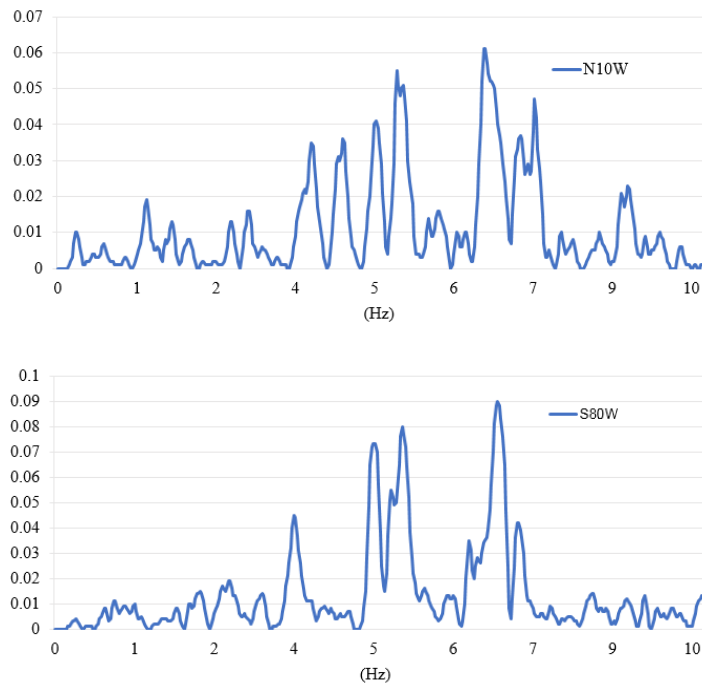


Figure IV.13. Spectre de puissance des accélérations de translation et de torsion du séisme de Petrolia



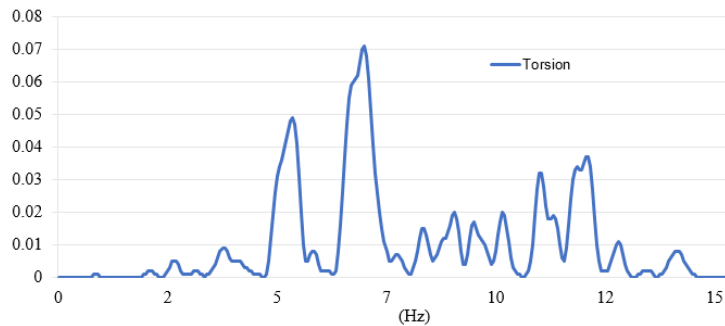


Figure IV.14. Spectre de puissance des accélérations de translation et de torsion du séisme de Christchurch

IV.4. Contribution de la composante sismique de torsion dans la réponse structurale

Afin de cerner la contribution du mouvement sismique de torsion, on a procédé à des simulations numériques, par éléments finis sous environnement Ansys, du comportement structural global vis-à-vis des actions sismiques. Et ce pour deux types de structures régulières et irrégulières. La première simulation a consisté à effectuer une analyse transitoire non-linéaire sous chargement bidirectionnel avec deux accélérogrammes de translation. La seconde simulation est similaire à la première mais sous chargement tri-directionnel, en ajoutant, en l'occurrence, un accélérogramme de torsion d'axe vertical. A travers, la comparaison des réponses en déplacement des deux analyses effectuées, on peut déduire la contribution du mouvement sismique de torsion dans la réponse structurale.

Les Figures IV.15 et IV.17 montrent la contribution de la composante sismique de torsion d'axe vertical par rapport aux deux autres composantes de translation, pour les deux structures régulière et irrégulière. Ainsi, pour les trois séismes retenus, l'augmentation du déplacement, pour la structure régulière étudiée, dû à l'accélération de torsion, se situe entre 6% et 12%. Pour la structure irrégulière, cette augmentation, plus importante, oscille entre 10% et 20%. Les augmentations constatées prouvent que la composante sismique de torsion d'axe vertical a un grand effet sur la réponse structurale, qui ne peut être ignoré.

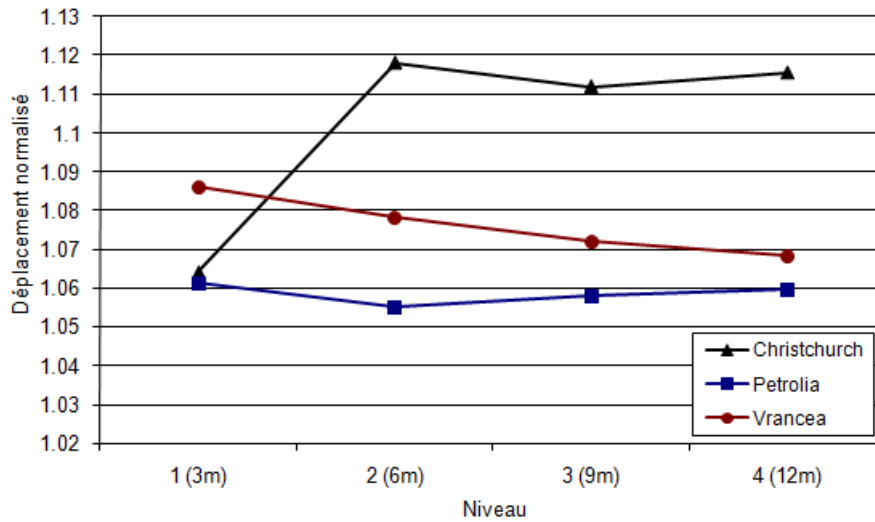


Figure IV.15. Augmentation du déplacement due à la composante sismique de torsion, pour la structure régulière

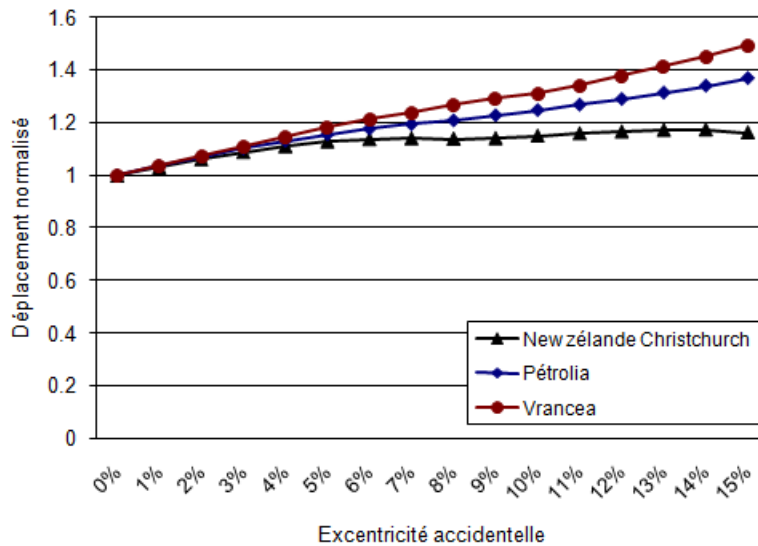


Figure IV.16. Augmentation du déplacement due à l'excentricité accidentelle ajoutée pour la structure régulière

Afin d'obtenir l'ordre de grandeur du pourcentage représentant cette amplification du déplacement due au mouvement sismique de torsion, des analyses dynamiques spectrales ont été entreprises pour les mêmes structures. Et ce, pour différentes valeurs d'excentricité accidentelle (entre 1% L et 15% L), c'est-à-dire en déplaçant le centre de gravité des masses de part et d'autre de sa position nominale. Les trois spectres de réponse utilisés ont été établis à partir des trois accélérogrammes de translation (Tableau IV.1).

Les augmentations de déplacement constatées dépassent largement les excentricités accidentelles additionnelles réglementaires. Ainsi lesdites augmentations correspondent à des excentricités accidentelles pouvant atteindre les 4% L et 15% L (L : largeur du plancher

perpendiculaire à l'action sismique) pour les structures étudiées régulière et irrégulière respectivement (Figures IV.16 et IV.18). A cet égard, il convient de rappeler que l'excentricité accidentelle réglementaire prend en compte, non seulement, la composante sismique de rotation d'axe vertical mais également toutes les incertitudes liées aux calculs des centres de masses et des rigidités.

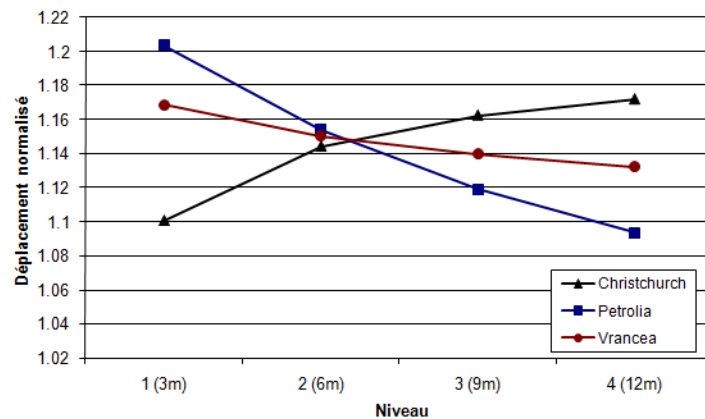


Figure IV.17. Augmentation du déplacement due à la composante sismique de torsion, pour la structure irrégulière

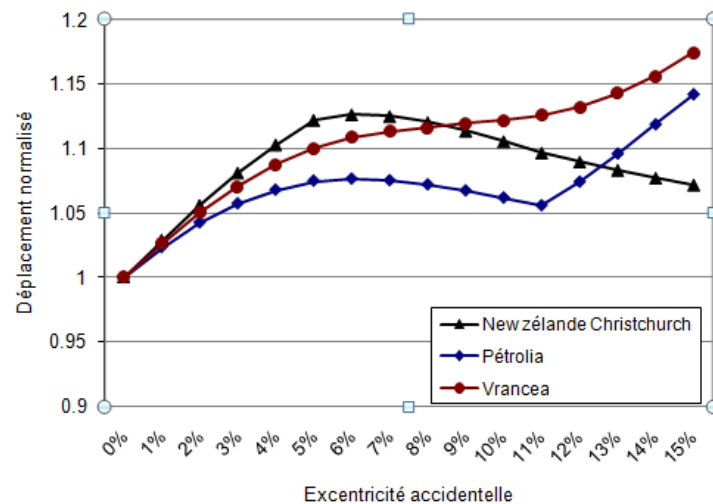


Figure IV.18. Augmentation du déplacement due à l'excentricité accidentelle ajoutée, pour la structure irrégulière

Conclusion

Les augmentations constatées prouvent que la composante sismique de torsion d'axe vertical a un grand effet sur la réponse structurale, qui ne peut être ignoré. De plus, lesdites augmentations constatées dépassent largement celles des excentricités accidentelles additionnelles réglementaires. Mais le degré de ces amplifications, variable d'un cas à l'autre, est tributaire de plusieurs paramètres.

CHAPITRE V

EFFET DE LA TORSION SISMIQUE INDUITE TRIBUTAIRES DES PROPRIETES DYNAMIQUES STRUCTURALES

V.1. Introduction

L'effet défavorable de la composante sismique de torsion est indéniable sur la réponse structurale, comme on l'a vu au chapitre précédent. Toutefois, l'importance de cet effet est tributaire de plusieurs paramètres qui vont être explorés dans le présent chapitre.

V.2. Caractéristiques des séismes utilisés

Le choix des mouvements sismiques réels a été effectué de telle façon à représenter les différentes catégories des sites et à disposer d'une large gamme de fréquences (contenu fréquentiel très large). La liste des accélérogrammes sélectionnés est présentée dans le tableau V.1. ci-dessous. Ces derniers sont tirés de la base des données « PEER Strong Motion Database ».

Tableau V.1. Caractéristiques des séismes sélectionnés

Séisme	Station	Mw	Distance épicentrale (kms)	PGA (g)	Vitesse des ondes de cisaillement (m/s)
L'Aquila Italy (06/042009)	V-Aterno V-Ateno (AQA)	6.3	4.6	0.44	549
Kocaeli Turkey (17/08/1999)	Izmit, Meteoroloji, Istasyona	7.6	09	0.22	826
Petrolia USA (25/04/1992)	CSMIP St n°89156	7.1	05	0.65	713
Christ-church New Zealand (21/02/2011)	Lyttelton Port Company	6.3	04	0.86	422
Imperial Valley (18/05/1940)	El-centro, 117	6.9	16.9	0.36	200

En se basant sur la deuxième méthode présentée dans le chapitre III (Lee and Trifunac , 1985), les composantes sismiques de rotation peuvent être obtenus en appliquant la transformée rapide de Fourier (FFT) aux cinq accélérogrammes de translation ci-dessus. Les accélérogrammes de torsion calculés sont présentés dans la Figure V.1.

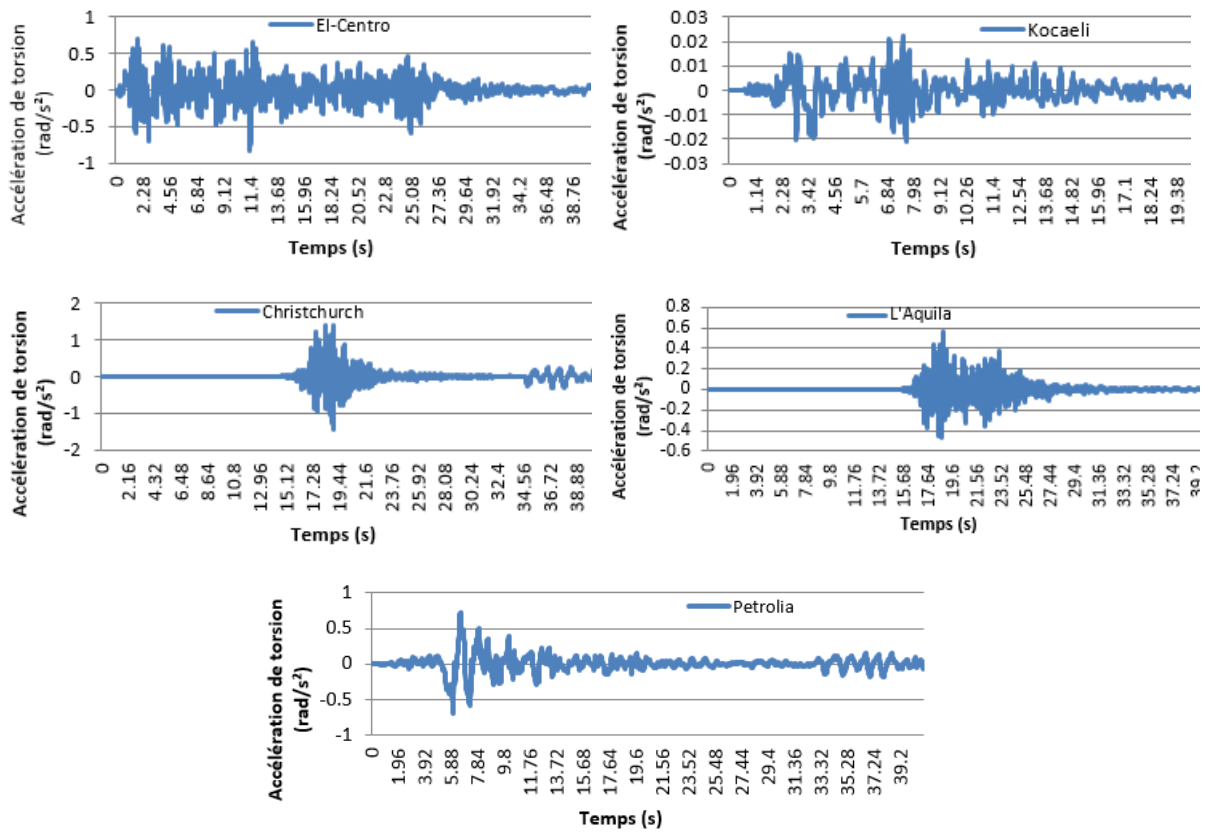
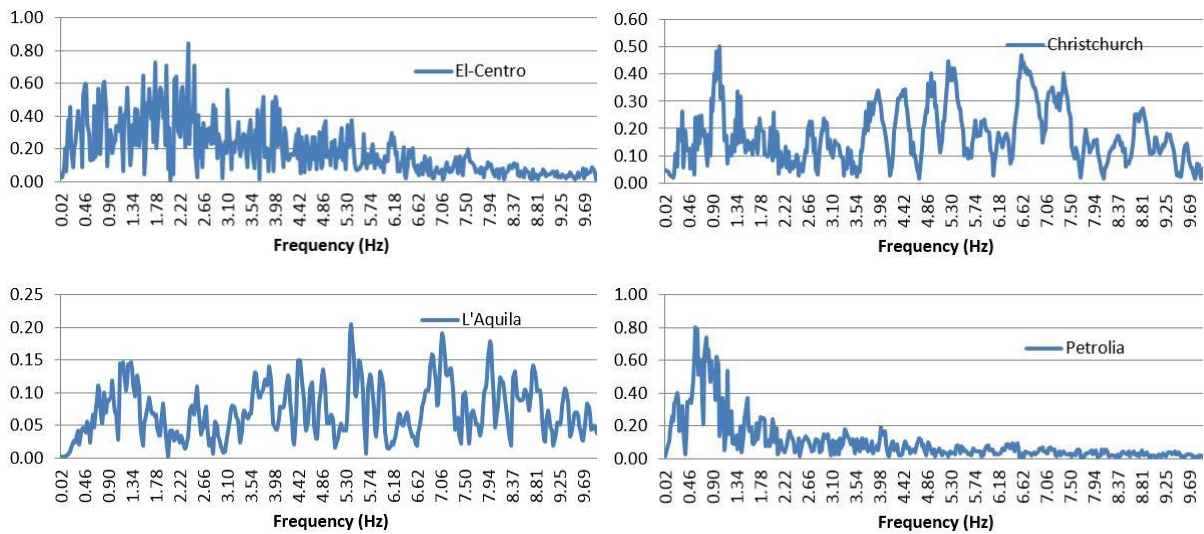


Figure V.1. Accélérogrammes de torsion calculés des séismes sélectionnés

Comme on peut le voir dans la Figure V.2, les spectres de Fourier des cinq accélérogrammes de torsion couvrent une large gamme de fréquences.



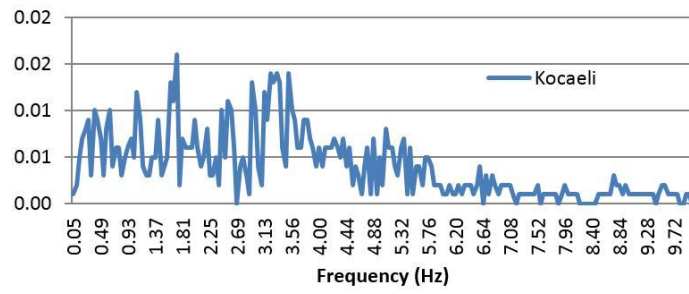


Figure V.2. Spectres de Fourier des accélérogrammes de torsion.

V.3. Description des structures étudiées

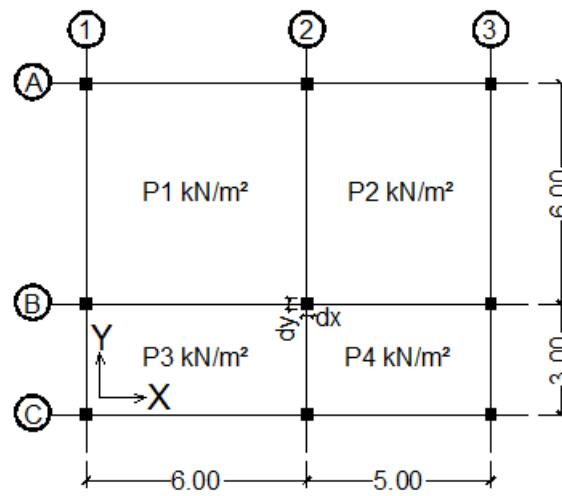


Figure V.3. Configuration en plan type des structures.

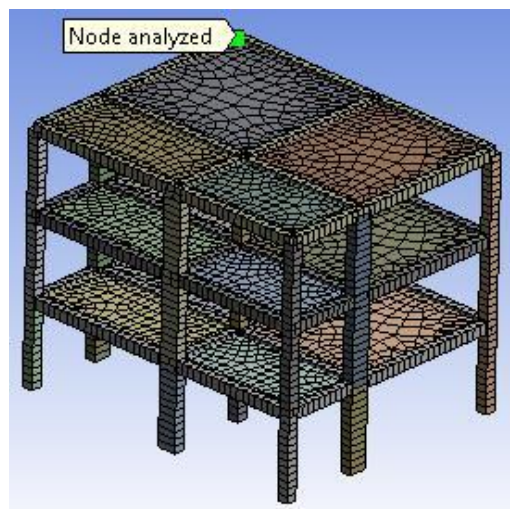


Figure V.4. Elévation type et nœud sélectionné pour l'analyse de la réponse structurale.

Les Figures V.3 et V.4 montrent l'étage courant et l'élévation type des structures en béton armé étudiées. Ces dernières ont été choisies pour différentes sensibilités à la torsion (rigidité et flexibilité à la torsion). Il s'agit d'utiliser plusieurs ratios de rigidité à la torsion sur la celle de translation, en faisant varier la position des portiques et leurs dimensions (voir Tableau V.2). Les dimensions en plan des structures sont de 11.40 m de longueur et 9.40 m de largeur. La hauteur d'étage est de trois (03) m. Les sections des poutres sont de 30x40 cm². L'épaisseur des planchers est 15 cm.

Tableau V.2. Description des dimensions et charges des sept modèles de structures étudiées

Modèle	Poteaux A1, A2, A3 (cm)		Poteaux B1, B2, B3 (cm)		Poteaux C1, C2, C3 (cm)		Charges verticales (kN/m ²)			
	dx	dy	dx	dy	dx	dy	P1	P2	P3	P4
M1	20	40	20	40	20	40	6	6	3	3
M2	20	20	20	40	20	40	6	6	3	3
M3	20	20	20	40	20	40	3	3	6	6
M4	20	20	20	40	20	40	3	9	3	3
M5	20	20	20	70	20	40	3	9	3	3
M6	20	20	20	60	20	40	3	9	3	3
Modèle	Poteaux A2, C2 (cm)		Poteaux B1, B3 (cm)		Poteaux A1, A3, B2, C1, C3 (cm)		Charges verticales (kN/m ²)			
	dx	dy	dx	dy	dx	dy	P1	P2	P3	P4
M7	70	40	40	70	40	40	6	6	6	6

Les sept bâtiments analysés sont des structures spéciales, désignées en anglais par “special class of multistory buildings”, possédant les caractéristiques suivantes :

- Les centres de masses de tous les étages se trouvent sur une même ligne verticale.
- Les éléments structuraux (portiques spatiaux) sont orthogonaux suivant les axes principaux X et Y et leurs centres de rigidité de tous les étages se trouvent sur une même ligne verticale.
- Les planchers sont des diaphragmes infiniment rigides dans leur plan.

Par ailleurs, ces structures asymétriques sont de trois niveaux. A cet égard, il convient de signaler que la composante sismique de torsion est très sensible aux structures ayant des périodes courtes (Stathopoulos et Anagnostopoulos, 2010).

V.4. Etude paramétrique

Une série d'analyses transitoires a été effectuée afin d'examiner l'influence de la composante sismique de torsion sur la réponse structurale. Pour ce faire, un paramètre élastique, caractérisant différentes réponses structurales à la torsion, a été retenu. C'est le ratio fréquentiel (Ω), qui est défini par l'équation (V.1) comme le rapport entre la fréquence principalement de torsion sur divisée par la fréquence principalement de translation :

$$\Omega = \frac{\omega_{\theta}}{\omega_x} \quad \text{Ou} \quad \Omega = \frac{\omega_{\theta}}{\omega_y} \quad (\text{V.1})$$

Les fréquences fondamentales peuvent être calculées par la procédure standard du calcul dynamique ou par la méthode de Rayleigh (Chopra 1995, De La Llera et Chopra, 1994).

Si le ratio fréquentiel Ω est supérieur à 1,2, la réponse structurale est principalement une translation et le comportement structurel est défini comme « rigide à la torsion ». Si Ω est inférieur à 0,8, la réponse est dominée dans une large mesure par la torsion et son comportement est définie comme étant « flexible à la torsion » (De La Llera et Chopra, 1995). Si le ratio fréquentiel Ω rapport est unitaire, le degré de couplage entre la translation et la torsion, susceptible de se produire, est au maximum.

Dans le cas d'une structure rigide à la torsion, c'est le mode de translation qui contrôle le déplacement dans la direction considérée. Ainsi, le comportement dynamique typique d'une telle structure est qualitativement similaire à la réponse obtenue en utilisant une analyse statique. En revanche, la réponse sismique d'une structure flexible à la torsion est qualitativement différente. Car l'enveloppe des déplacements de la structure dépend à la fois des modes de translation et de torsion.

Les propriétés dynamiques des structures étudiées tridimensionnel ont été calculées numériquement par des analyses modales et sont résumées dans le tableau V.3. On remarque

que le modèle M7 est rigide à la torsion dans les deux directions principales (X et Y) ; tandis que les autres sont flexibles à la torsion dans la direction X.

Tableau V.3. Fréquences, ratios fréquentiels et pourcentage des masses effectives

Modèle	Mode	Fréquence (Hz)	Masse effective (%)		Moment d'inertie massique effectif (%)	Ratio fréquentiel
			Ux	Uy	Rz	
M1	1	0.91	0.01	90.69	0.01	$\Omega_x=0.846$ $\Omega_y=1.75$
	2	1.6	28.80	0.01	65.70	
	3	1.89	61.74	0.00	25.89	
M2	1	0.79	1.13	88.14	1.54	$\Omega_x=0.538$ $\Omega_y=1.06$
	2	0.84	41.60	2.64	50.11	
	3	1.56	47.98	0.01	39.97	
M3	1	0.86	0.19	90.15	0.32	$\Omega_x=0.535$ $\Omega_y=1.151$
	2	0.99	33.11	0.58	50.58	
	3	1.85	57.26	0.01	40.74	
M4	1	0.83	2.23	85.10	7.94	$\Omega_x=0.484$ $\Omega_y=1.096$
	2	0.91	37.19	5.66	46.91	
	3	1.88	51.10	0.01	36.86	
M5	1	0.94	0.35	88.69	4.82	$\Omega_x=0.423$ $\Omega_y=1.191$
	2	1.12	18.14	1.89	70.04	
	3	2.65	0.02	7.45	0.42	
M6	1	0.91	0.47	88.56	4.94	$\Omega_x=0.430$ $\Omega_y=1.176$
	2	1.07	22.60	2.08	65.60	
	3	2.49	66.87	0.00	21.47	
M7	1	2.20	0.18	72.04	0.00	$\Omega_x=1.36$ $\Omega_y=1.35$
	2	2.21	77.50	0.19	0.00	
	3	2.99	0.78	0.04	0.06	

Pour illustrer l'effet de la composante sismique de torsion, des analyses dynamiques transitoires ont été réalisées avec le logiciel d'éléments finis « Ansys ». Les structures analysées ont d'abord été excitées simultanément par les deux composantes sismiques de translation

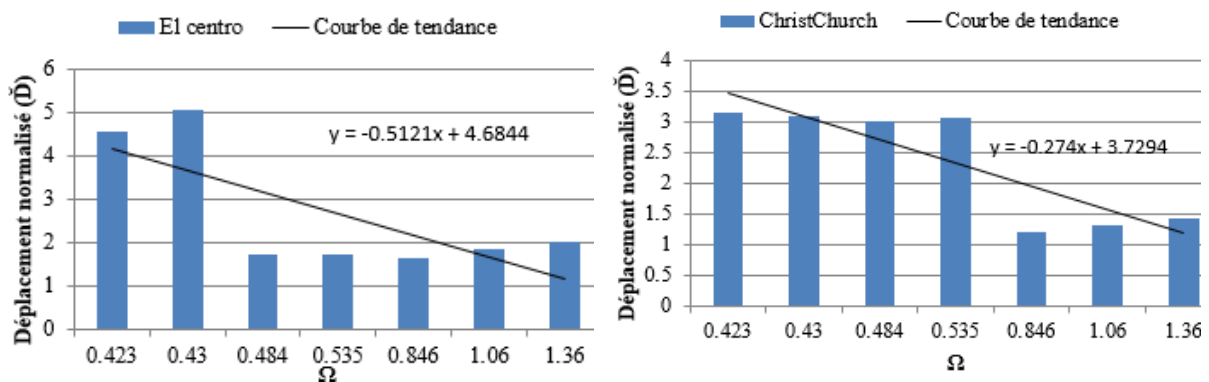
horizontale et celle de torsion. Par la suite, seulement par les deux composantes de translation horizontale. Les accélérographes de torsion calculés, à l'aide de la méthode de Lee et de Trifunac, à partir de ceux de translation enregistrés ont été implémentés dans Ansys. A cet égard, il convient de signaler que le logiciel Ansys permet d'introduire des accélérations linéaires et angulaires par rapport au repère cartésien global.

La contribution de la composante sismique de torsion est évaluée en comparant les réponses structurales en termes de déplacements (Δ) sous les deux conditions de chargement évoquées précédemment :

1. $\Delta_{\text{TRANS} + \text{ROT}}$: le déplacement maximal pour le modèle étudié (nœud sélectionné sur la figure V.4) soumis à trois accélérographes.
2. Δ_{TRANS} : correspond au même résultat précédent mais obtenu lorsque le modèle est soumis aux deux accélérographes de translation seulement.

Si le déplacement normalisé ($\check{D} = \Delta_{\text{TRANS} + \text{ROT}} / \Delta_{\text{TRANS}}$) est supérieur à l'unité, ceci implique que la composante sismique de torsion amplifie la réponse structurale.

La figure V.5. montre l'augmentation du déplacement due à la composante sismique de torsion. Les tendances générales des courbes des systèmes couplés sont semblables à celles obtenues pour les modèles simplifiés à un étage dans la littérature (Xuanhua et al., 2014, Hernández et López, 2004, Raduka et Nikolic, 2010).



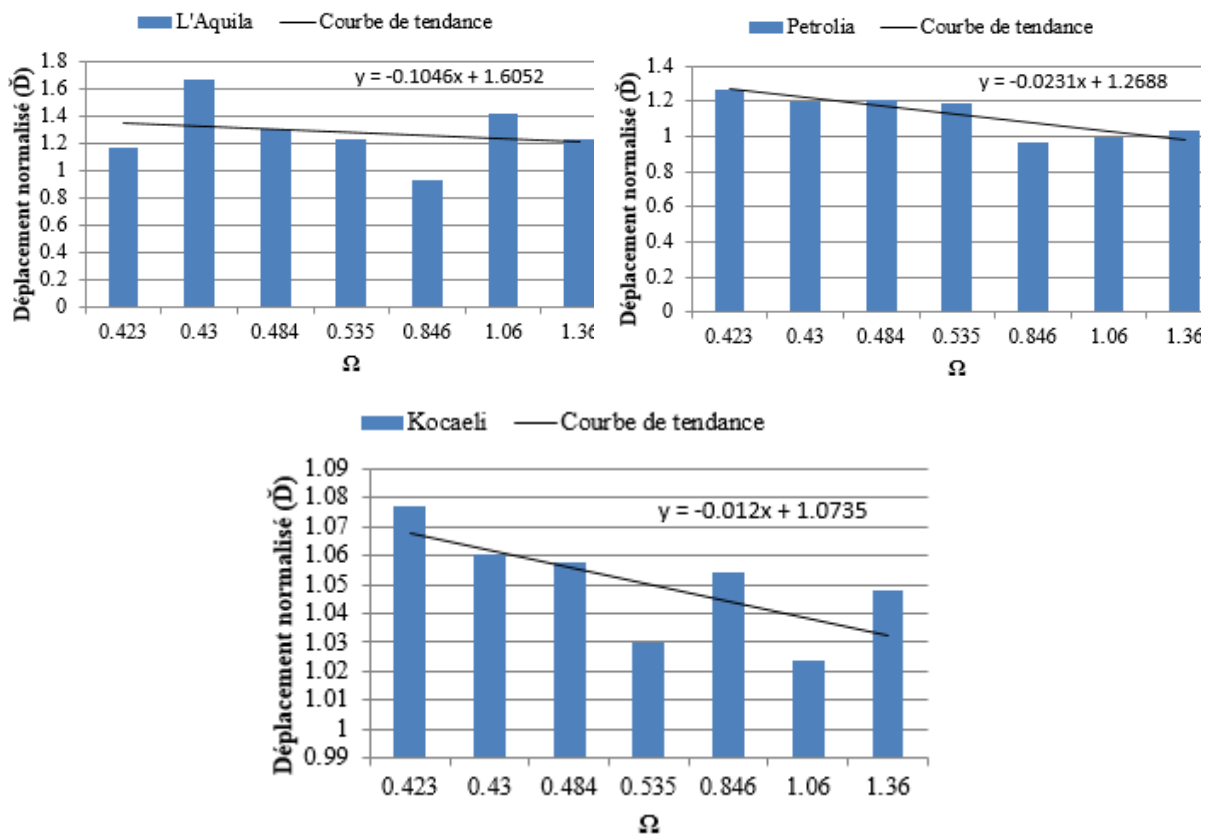


Figure V.5. Effet du ratio fréquentiel sur le déplacement normalisé.

On voit que le déplacement normalisé \check{D} diminue à mesure que la valeur du ratio Ω augmente, ce qui signifie que le système structural devient rigide à la torsion. En d'autres termes, les réponses des bâtiments flexibles à la torsion sont sensibles à l'excitation sismique de torsion. On peut voir également à partir de la Figure V.5 que la résonance entre les fréquences de translation et de torsion, c'est-à-dire quand $\Omega=1$, n'est pas un problème critique.

Toujours d'après la Figure V.5, pour les petites valeurs du ratio fréquentiel ($\Omega = 0,423, 0,43$ et $0,535$), le déplacement normalisé \check{D} a des valeurs élevées dans deux cas : séismes El-Centro et Christchurch ($\check{D} = 5$ et $3,15$, respectivement). Pour les autres séismes, L'Aquila, Petrolia et Kocaeli, les déplacements normalisés sont moindres ($\check{D} = 1,67, 1,26$ et $1,07$, respectivement).

A cet égard, les Figures V.2, V.3 et V.5 montrent que les valeurs les plus élevées du déplacement normalisé ($\check{D} = 5$ et 3.15) se produisent sous la résonance entre les mouvements sismiques de translation et les structures. Les fréquences dominantes des séismes El-Centro ($0,49-2,37\text{Hz}$) et Christchurch ($0,85-7\text{Hz}$) correspondent aux fréquences fondamentales des sept modèles analysés ($0,79\text{ Hz}, 0,83\text{ Hz}, 0,86\text{ Hz}, 0,91\text{ Hz}, 0,94\text{ Hz}$ et $2,20\text{ Hz}$). Mais cette résonance ne se produit pas dans le cas du séisme de Petrolia ($\check{D} = 1.26$), pour lequel le contenu

fréquentiel correspond aussi (0.49-2.37Hz). Par conséquent, il est clair que la réponse structurale dépend non seulement des caractéristiques sismiques mais également des propriétés du sol.

En effet, la Figure V.6 montre que le déplacement normalisé \check{D} augmente à mesure que la vitesse de l'onde de cisaillement diminue. Ainsi, les conditions du sol peuvent influencer de façon significative l'augmentation de la réponse en déplacement due à la composante sismique de torsion. L'amplification est plus significative pour les petites valeurs de vitesse d'onde de cisaillement (sols Meuble et très meuble). Cependant, pour des valeurs plus élevées (sols Ferme et Rocheux), l'amplification est considérablement réduite.

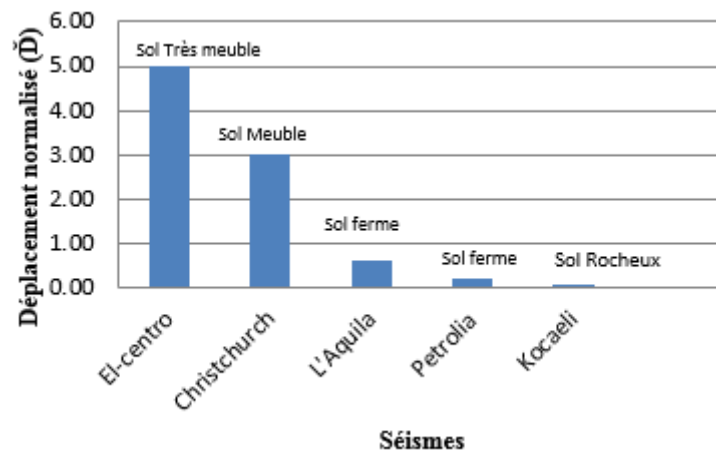


Figure V.6. Dépendance du déplacement normalisé des conditions des sites

Conclusion

Les réponses structurales des bâtiments flexibles à la torsion sont plus sensibles à l'excitation sismique de torsion. Et que la résonance entre les fréquences de translation et de torsion, n'est pas un problème critique. De plus, l'amplification est significative pour les petites vitesses d'ondes de cisaillement (sols Meuble et très meuble). Cependant, pour des valeurs plus élevées (sols Ferme et Rocheux), l'amplification est considérablement réduite.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Les analyses et calculs sismiques sont traditionnellement basés sur les mouvements sismiques de translation. Quant aux composantes de rotation, torsion d'axe vertical et basculement d'axes horizontaux, elles ne sont pas considérées, parce que de telles composantes ne sont pas enregistrables et leurs effets sur la réponse structurale sont inconnus.

La caractérisation des mouvements sismiques de rotation d'axe vertical et l'analyse de leurs effets sur la réponse structurale sont les objectifs de cette thèse. Parce que les accélérogrammes de rotation ne sont pas disponibles, des procédures analytiques sont utilisées pour l'extraction de la composante sismique de torsion à partir d'accélérogrammes de translation enregistrés dans une station.

En pratique, c'est l'excentricité accidentelle qui est utilisée dans les codes parasismiques pour tenir compte des incertitudes relatives aux propriétés mécaniques et à la répartition massique dans les structures et aux effets de la rotation sismique d'axe vertical. A cet égard, la méthode recommandée par lesdits codes consiste à ajouter une excentricité additionnelle, appelée accidentelle, en déplaçant le centre de gravité des masses, de part et d'autre de sa position nominale, d'une distance égale à une fraction de la dimension de la structure perpendiculaire à la direction de l'action sismique. Cette méthode ne fait l'unanimité dans les codes parasismiques, comme en témoigne le calcul de l'excentricité accidentelle, notamment la fraction de la dimension du bâtiment, qui varie d'un pays à l'autre. Cette méthode fait aussi l'objet d'une contestation grandissante dans la littérature spécialisée. Le fait d'ajouter un moment de torsion façon statique est jugé insuffisant, pour tenir compte de l'effet dynamique de l'excentricité accidentelle.

Dans cette thèse, des investigations sur les effets des mouvements sismiques de rotation d'axe vertical ont été entreprises. Tout d'abord, les accélérogrammes de torsion ont été extraits et implémentés dans le code de calculs Ansys. Ensuite des analyses linéaires et non-linéaires sur des structures en béton armé régulières et irrégulières, à plusieurs étages, sont effectuées. Et ce, pour des excitations sismiques de translation et de torsion.

Les principales conclusions sont résumées par les points suivants :

- A partir des analyses linéaires et non-linéaires des structures étudiées, il est indéniable que les mouvements sismiques de rotation d'axe vertical ont un effet défavorable non négligeable sur la réponse structurale. De surcroît, les structures irrégulières sont plus sensibles auxdits mouvements.
- La torsion accidentelle, induite par la composante sismique de torsion, dépend fortement du ratio fréquentiel Ω . Les structures flexibles à la torsion sont plus sensibles à cette composante. Cependant, l'effet de cette dernière est moindre pour les structures rigides à la torsion.
- L'excentricité accidentelle, recommandée par plusieurs codes parasismiques existants, de 5% de la dimension du plancher perpendiculaire au séisme est largement dépassée. Ainsi, d'après les résultats trouvés, la part, dans cette excentricité additionnelle, due aux mouvements différentiels des fondations de la structure peut atteindre les 4% et 15% de la dimension perpendiculaire au séisme, pour les structures régulières et irrégulières respectivement. Ceci conduit à suggérer que l'excentricité accidentelle devrait probablement être améliorée par une disposition plus efficace.
- Les composantes sismiques de rotation et leurs effets sont plus compliqués et nécessitent davantage d'études pour appuyer les résultats trouvés (des accélérogrammes de rotation plus précis et des structures de différentes configurations en plan et en élévation, avec différentes hauteurs et ce, pour plusieurs types de contreventement). Bien sûr, des investigations expérimentales, difficilement réalisables (excitation sismique de rotation enregistrée), sont nécessaires pour confirmer les conclusions de cette étude.

Perspectives

La définition de l'action sismique dépend de plusieurs paramètres propres à chaque type de structure et de terrain étudié. Il serait donc intéressant d'étudier l'influence de chacun de ces paramètres, en construisant des accélérogrammes de torsion en fonction des fréquences. Ensuite, des analyses sismiques non-linéaires peuvent être conduites sur des structures pour

différentes fréquences propres. Ceci n'a pas été fait dans cette thèse, car un grand effort était consacré au défi d'effectuer un calcul numérique de structure spatiale avec un accélérogramme de torsion, chose non habituelle, car les logiciels de calculs n'offrent pas cette possibilité. Seuls les accélérogrammes de translation peuvent être implémentés. A cet égard, la méthode numérique en trois dimensions utilisée dans cette thèse a l'avantage, par rapport à la méthode analytique pour le modèle simplifié à une seule niveau, de pouvoir être utilisée pour des structures plus compliquées comprenant des voiles ou ayant des non-linéarités différentes.

REFERENCES

- Abdel-Ghaffar A.M., Rubin LI. Torsional response of suspension bridge, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1984, 110, pp. 1467-1484.
- Awad A.M., Humar J.L. Dynamic response of buildings to ground rotational motions, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1984, 11, pp. 48-56.
- Basu D., Whittaker A.S., Constantinou, M. C. Estimating rotational components of ground motion using data recorded at a single station, *Journal of Mechanics Engineering*, 2012, 138, 9, pp. 1141-1156.
- Basu D., Whittaker A.S., Constantinou M. C. Extracting rotational components of earthquake ground motion using data recorded at multiple stations, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42, 3, pp. 451-468.
- Brokešová J.; Málek J.; Štrunc J. Rotational Seismic Sensor System, Seismic Measuring Set Containing that System, and Seismic Survey Method. Patent CZ301217 B6, 8 December 2009.
- Castellani A., Boffi G. Rotational components of the surface ground motion during an earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1986, 14, pp. 751-767.
- Cheung V.W.T., Tso, W.K. Eccentricity in irregular multi-story buildings, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1986, 13(1), pp. 46-52.
- Chopra A.K., *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake*, Prentice-Hall, New Jersey, 1995, 729p.
- Cochard A., Igel H., Schuberth B., Suryanto W., Velikoseltsev A., Schreiber, U., Wassermann J., Scherbaum F., Vollmer D. Rotational motions in seismology: theory, observation, simulation, in *earthquake source asymmetry, Structural Media and Rotation Effects*, R. Teisseyre, et al. (Editors), 2006, pp. 391-411.
- De Llera J.C., Chopra A.K. Accidental torsion in buildings due to bases rotational excitation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1994, 23, pp. 1003-1021.
- Dimova S., Alashki I., "Seismic Design of Symmetric Structures for Accidental Torsion," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2003, 1, pp. 303-320.
- Enache R. Natural and accidental torsional effects induced by Vrancea earthquakes, *Proceedings of the Fourteenth European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, Republic of Macedonia, August, 2010.
- Eurocode (EC8-1). *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures*, European committee for standardization EN1998-1, 2004.
- Fajfar P., Kreslin M., *Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples*, Introduction to the RC building example. Modeling and analysis of the design example, *Worked examples presented at the Workshop "EC 8: Seismic Design of Buildings"*, Lisbon, 10-11 Feb. 2011, JRC Scientific and Technical Reports, 2012.
- Falamarz-Sheikhabadi M.R. Simplified relations for the application of rotational components to seismic design codes. *Engineering Structures*, 2014, 59, pp. 141-152.
- Fardis M. et al., *Designers' guide to EN 1998-1 and 1998-5. Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistant structures*, London, Thomas Telford, 2005.
- Filiatrault André, *Eléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*, Editions l'école polytechnique de Montréal, 1996, 478p.
- Geol R.K., Chopra A.K. Dual-Level Approach for Seismic Design of Asymmetric-Plan Building, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1994, 120, pp. 161-179.
- Ghayamghamian M.R., Nouri G.R., Igel H., Tobita T. The effects of torsional structural ground motion one responses: code recommendation for accidental eccentricity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99, 2B, pp. 1261-70.
- Gupta V.K., Trifunac M.D. Response of multistoried buildings to ground translation and torsion during earthquakes, *European Earthquake Engineering*, IV, 1990, 1, pp. 34-42.

- Havskov J., Alguacil, G. *Instrumentation in Earthquake Seismology*, 2nd ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2016.
- He C., Luo, Q. Impact of seismic rotational components on symmetric structures, O. Lavan and M. De Stefano (Editions), *Seismic Behavior and Design of Irregular and Complex Civil Structures*, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 2013, 24.
- Hejal R., Chopra A. K. *Earthquake response of torsionally coupled buildings: Earthquake Engineering Research Centre, University of California at Berkeley, Report no UCB/EERC-87/20*, 1987.
- Hernández J. J., López O. A. Dependence of Accidental Torsion on Structural System Properties, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004, 1165, pp. 1-6.
- Hinzen K.G., Cucci L., Tertulliani A. Rotation of Objects during the 2009 L'Aquila Earthquake Analyzed with 3D Laser Scans and Discrete-Element Models, *Seismological Research Letters*, 2013, 84(5), pp. 745-751. DOI: 10.1785/0220130010
- Kurzych A., Jaroszewicz L.R., Krajewski Z., Teisseyre K.P., Kowalski J.K. Fibre optic system for monitoring rotational seismic phenomena, *Sensors*, 2014, 14, pp. 5459–5469.
- Lee V. W., Trifunac M.D. Torsional accelerograms, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1985, 4, pp. 132-139.
- Leszek R. Jaroszewicz, Anna Kurzych, Zbigniew Krajewski, Jerzy K. Kowalski, Piotr Bobra, Zbigniew Zembaty, Paweł Marć, Bartosz Sakowicz and Robert Jankowski. Review of the Usefulness of Various Rotational Seismometers with Laboratory Results of Fibre-Optic Ones Tested for Engineering Applications, *Sensors*, 2016, 16, 2161; Doi:10.3390/s16122161
- Li H., Sun L., Wang S. Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion, *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 232, pp. 131-137.
- Makarios T., Anastassiadis K. Real and fictitious elastic axes of multi-storey buildings: theory, *Struct Des Tall Spec Build* 1998, 7, pp. 33–55,
- Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 1988, pp. 1804–1826. Doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
- Mistler, M., Valleys, J. P. Vulnerability assessment of RC frame structures using lightweight sandwich floor-systems. 13th World Conference on Earthquake Vancouver Engineering, B.C., Canada August, 2004.
- Myslimaj B, Tso WK. A strength distribution criterion for minimizing torsional response of asymmetric wall-type systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2002, 31, pp. 99–120.
- Nazarov Y. P., Poznyak E., Filimonov A. V. A brief theory and computing of seismic ground rotations for structural analyses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 71, pp. 31–41.
- Newmark N.M. Torsion in symmetrical buildings, *Proceedings of the fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, 1969, pp. 19-32.
- Penzien J., Watabe Mr. Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1975, 3, pp. 365-373.
- Raduka V., Nikolić M. Effect of accidental torsion on seismic response of symmetrical structures, *Gradevinar*, 2010, 62(10), pp. 951-957.
- Smith B. S., Vezina S. Evaluation of centres of resistance in multi-storey building structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 2- Research and Theory*, 1985, 79(DEC), pp. 623-635.
- Spudich P. Steck L.K., Hellweg M., Fletcher J.B., Baker L.M. Transient stresses at Park-field, California, produced by the M7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from UPSAR dense seismograph array, *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100, pp. 675-690.
- Stathopoulos KG, Anagnostopoulos SA. Inelastic earthquake response of single-story asymmetric buildings: an assessment of simplified shear-beam models. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2003, 32, 1813–31.

- Stathopoulos KG, Anagnostopoulos SA. Inelastic torsion of multistory buildings under earthquake excitations, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34, pp. 1449–65.
- Stathopoulos K.G., Anagnostopoulos, S. G. Accidental design eccentricity: is it important for the inelastic response of buildings to strong earthquakes?, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30, pp. 782-797.
- Sun S.J., Chen G.X. The synthetic method of rotational component of ground motion, *Journal of Seismology*, 1998, 1, pp. 19-24.
- Suryanto W., Igel, H., Wassermann, J., Cochard, A., Schubert, B., Vollmer, D., Scherbaum, F. Comparison of seismic array-derived rotational motions with direct ring laser measurements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96, 6, pp. 2059–2071.
- Takeo M. Ground rotational motions recorded in near-source region of earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 1998, 25, 6, pp. 789-792.
- Teisseyre R. Nagahama, H. Micro-inertia continuum. Rotations and semi-waves, *Acta Geophys. Pol.* 1999, 47, pp. 259–272.
- Trifunac M. D. A note on rotational components of earthquake motions for incident body waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1982, 1, pp. 11-19.
- Tso W.K., Myslimaj B. A yield displacement distribution-based approach for strength assignment to lateral force-resisting elements having strength dependent stiffness. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32, pp. 2319–51.
- Tso, W.K., Dempsey, K.M., Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1980, 8, pp. 275–289.
- Xuanhua F., Jiacong Y., Shuli S., Pu C. An alternative approach for computing seismic response with accidental eccentricity, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 13, pp. 401-410. Doi:10.1007/s11803-014-0251-z

ANNEXES

Annexe A : Programme d'implémentation des accélérogrammes de torsion et de modélisation dans le code Ansys

```
/batch
/config,noelddb,1 ! force off writing results to database
*get,_wallstrt,active,,time,wall
! ANSYS input file written by Workbench version 15.0 Version
! File used for geometry attach: D:\DOCTORAT
ASMA\THESER+3_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
/title,THESER+3--Transitoire (A5)
*DIM,_wb_ProjectScratch_dir,string,248
_wb_ProjectScratch_dir(1) = 'D:\DOCTORAT ASMA\THESER+3_files\dp0\SYS\MECH\'
*DIM,_wb_SolverFiles_dir,string,248
_wb_SolverFiles_dir(1) = 'D:\DOCTORAT ASMA\THESER+3_files\dp0\SYS\MECH\'
*DIM,_wb_userfiles_dir,string,248
_wb_userfiles_dir(1) = 'D:\DOCTORAT ASMA\THESER+3_files\user_files\'
/com,--- Data in consistent MKS units.
/units,MKS
/nopr
/wb,file,start ! signify a WB generated input file
/prep7
! Turn off shape checking because checks already performed inside WB mesher.
! See help system for more information.
SHPP,OFF,,NOWARN
/nolist
etcon,set ! allow ANSYS to choose best KEYOP's for 180x elements
!Material Id = {F682582C-B3E2-4B13-939C-3C0CEDEE12B6}
/wb,elem,end ! done creating elements
/com,***** Send User Defined Coordinate System(s) *****
csys,0
tofst,273.15, ! Temperature offset from absolute zero
/com,***** Set Reference Temperature *****
tref,22.
/wb,mat,start ! starting to send materials
/com,***** Send Materials *****
MP,DENS,1,7850, ! kg m^-3
MP,ALPX,1,1.2e-05, ! C^-1
MP,C,1,434, ! J kg^-1 C^-1
MP,KXX,1,60.5, ! W m^-1 C^-1
MP,RSVX,1,1.7e-07, ! kg m^3 A^-2 s^-3
MP,EX,1,21000000000, ! Pa
MP,NUXY,1,0.3,
MP,MURX,1,10000,

TB,BISO,1,1,
TB,DATA,1,250000000,2100000000

MP,DENS,2,2300, ! kg m^-3
```

MP,ALPX,2,1.4e-05, ! C^-1
MP,C,2,780, ! J kg^-1 C^-1
MP,KXX,2,0.72, ! W m^-1 C^-1
MP,EX,2,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,2,0.18,

TB,PLAS,2,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,3,2300, ! kg m^-3
MP,ALPX,3,1.4e-05, ! C^-1
MP,C,3,780, ! J kg^-1 C^-1
MP,KXX,3,0.72, ! W m^-1 C^-1
MP,EX,3,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,3,0.18,

TB,PLAS,3,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,4,2300, ! kg m^-3
MP,ALPX,4,1.4e-05, ! C^-1
MP,C,4,780, ! J kg^-1 C^-1
MP,KXX,4,0.72, ! W m^-1 C^-1
MP,EX,4,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,4,0.18,

TB,PLAS,4,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,5,2300, ! kg m^-3
MP,ALPX,5,1.4e-05, ! C^-1
MP,C,5,780, ! J kg^-1 C^-1
MP,KXX,5,0.72, ! W m^-1 C^-1
MP,EX,5,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,5,0.18,

TB,PLAS,5,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,6,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,6,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,6,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,6,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,6,30000000000, ! Pa
MP,NUXY,6,0.18,

TB,PLAS,6,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,7,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,7,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,7,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,7,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,7,30000000000, ! Pa
MP,NUXY,7,0.18,

TB,PLAS,7,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,8,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,8,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,8,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,8,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,8,30000000000, ! Pa
MP,NUXY,8,0.18,

TB,PLAS,8,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,9,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,9,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,9,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,9,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,9,30000000000, ! Pa
MP,NUXY,9,0.18,

TB,PLAS,9,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,10,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,10,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,10,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,10,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,10,30000000000, ! Pa
MP,NUXY,10,0.18,

TB,PLAS,10,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,11,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,11,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,11,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,11,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,11,30000000000, ! Pa
MP,NUXY,11,0.18,

TB,PLAS,11,1,5,KINH
TBTEMP,0

TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,12,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,12,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,12,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,12,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,12,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,12,0.18,

TB,PLAS,12,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,13,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,13,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,13,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,13,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,13,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,13,0.18,

TB,PLAS,13,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,14,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,14,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,14,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,14,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,14,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,14,0.18,

TB,PLAS,14,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,15,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,15,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,15,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,15,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,15,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,15,0.18,

TB,PLAS,15,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,16,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,16,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,16,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,16,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,16,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,16,0.18,

TB,PLAS,16,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

MP,DENS,17,2300, ! kg m⁻³
MP,ALPX,17,1.4e-05, ! C⁻¹
MP,C,17,780, ! J kg⁻¹ C⁻¹
MP,KXX,17,0.72, ! W m⁻¹ C⁻¹
MP,EX,17,3000000000, ! Pa
MP,NUXY,17,0.18,

TB,PLAS,17,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

/wb,mat,end ! done sending materials
/com,***** Send Sheet Properties *****
sectype,2,shell
secdata,0.2

secoff,mid
sectype,3,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,4,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,5,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,6,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,7,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,8,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,9,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,10,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,11,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,12,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,13,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,14,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,15,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,16,shell
secdata,0.2
secoff,mid
sectype,17,shell
secdata,0.2
secoff,mid

/com,***** Send Beam Properties *****
SECTYPE,1,BEAM,RECT
SECDATA,0.4,0.4

```

secoffset,cent
! ***** Begin Command Snippet *****
*set,matid,1
! Commands inserted into this file will be executed just after material definitions in /PREP7.
! The material number for this body is equal to the parameter "matid".

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V,
A)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent
solver unit system.
! See Solving Units in the help system for more information.

MP,DENS,18,2300, ! kg m^-3
MP,ALPX,18,1.4e-05, ! C^-1
MP,C,18,780, ! J kg^-1 C^-1
MP,KXX,18,0.72, ! W m^-1 C^-1
MP,EX,18,30000000000, ! Pa
MP,NUXY,18,0.18,

TB,PLAS,18,1,5,KINH
TBTEMP,0
TBPT,,0,15000000
TBPT,,0.001,21000000
TBPT,,0.0015,25000000
TBPT,,0.002,30000000
TBPT,,0.003,30000000

SECTYPE,1,BEAM,MESH,
SECOFFSET,CENT,,
SECREAD,'D:\SECABDER_40x40POUTRE','SECT',' ',MESH
! ***** End Command Snippet *****
!***** Model Summary *****
!Corps filaire, Acier standard_abder,matid, 1
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 2
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 3
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 4
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 5
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 6
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 7
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 8
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 9
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 10
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 11
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 12
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 13
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 14
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 15
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 16
!Corps surfacique, Béton_abder, matid, 17

```

```

!***** End Model Summary *****
! get the diagonal of the bounding box. Needed later for other things
*get,_xmin,node,,mnloc,x
*get,_ymin,node,,mnloc,y
*get,_zmin,node,,mnloc,z
*get,_xmax,node,,mxloc,x
*get,_ymax,node,,mxloc,y
*get,_zmax,node,,mxloc,z
_ASMDIAG=(_xmax-_xmin)*(_xmax-_xmin)+(_ymax-_ymin)*(_ymax-_ymin)+(_zmax-
_zmin)*(_zmax-_zmin)
_ASMDIAG=SQRT(_ASMDIAG)
/wb,contact,start      ! starting to send contact
/wb,contact,end       ! done creating contacts
/golist
/wb,load,start        ! starting to send loads
/com,***** Fixed Supports *****
CMBLOCK,_FIXEDSU,NODE,    9
(8i10)
    101    217    240    263    286    309    332    355
    467
cmsel,s,_FIXEDSU
d,all,all
nsel,all
nsel,all
tblest
/gst,on,on
fini
*get,_numnode,node,0,count
*get,_numelem,elem,0,count
*get,_MAXELEMNUM, elem, 0, NUM, MAX
*get,_MAXNODENUM, node, 0, NUM, MAX
*get,_MAXELEMTYPE, etyp, 0, NUM, MAX
*get,_MAXREALCONST, real, 0, NUM, MAX
/go
/wb,load,end          ! done creating loads
/com,--- Number of total nodes = %_numnode%
/com,--- Number of contact elements = 0
/com,--- Number of spring elements = 0
/com,--- Number of bearing elements = 0
/com,--- Number of solid elements = 1624
/com,--- Number of total elements = %_numelem%
*get,_wallbsol,active,,time,wall
/com,*****
*****
/com,***** SOLUTION
*****
/com,*****
*****
/solu
antype,4              ! transient analysis

```

```

nlgeom,on          ! Turn on Large Deformation Effects
solc,on,on        ! Turn on solution control with ability to use contact time prediction
kbc,1            ! stepped BC's
eqsl,sparse,,,,,1
cntr,print,1      ! print out contact info and also make no initial contact an error
trnopt,full,,,,,hht ! HHT time integration method
tintp,0.1        ! Numerical Damping
nldiag,cont,iter  ! print out contact info each equilibrium iteration
resc,define,last,last,,dele ! Program Controlled
/com,*****
/com,***** SOLVE FOR LS 1 *****
/nopr
/gopr
autots,off        ! User turned off automatic time stepping
deltim,2.e-003,2.e-003,2.e-003
time,30.
timint,on        ! Turn on time integration effects
outres,erase
outres,all,none
outres,nsol,all
outres,rsol,all
outres, strs,all
outres,epel,all
outres,eppl,all
outres,v,all
outres,a,all
/nopr
esel,s,mat,,1
cm,_elmisc,elem
esel,all
/gopr
outres,misc,all,_elmisc
stabilize,off    ! Stabilization turned OFF by user
! ***** Begin Command Snippet *****
! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE
command.
! These commands may supersede command settings set by Workbench.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V,
A)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent
solver unit system.
! See Solving Units in the help system for more information.

fini
/config,nres,100000
/solu
! ***** End Command Snippet *****
! ***** Begin Command Snippet *****

```

! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.

! These commands may supersede command settings set by Workbench.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V, A)

! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.

! See Solving Units in the help system for more information.

```
*DIM,dataPath,STRING,128
```

```
*DIM,fileName,STRING,128
```

```
fileName(1,1)='vrancea 77 acc ang seules 3'
```

```
dataPath(1,1)='D:\DOCTORAT ASMA\Accelelogrammes\'
```

```
dataPath(1,1)=STRCAT(dataPath(1,1), fileName(1,1))
```

```
*DIM,Tt,table,152,1,1,TIME
```

```
*TREAD,Tt,dataPath(1,1),txt,,1
```

```
DOMEGA,0,0,% Tt%
```

```
Alls
```

```
! ***** End Command Snippet *****
```

```
! ***** WB SOLVE COMMAND *****
```

```
! check interactive state
```

```
*get,ANSINTER_,active,,int
```

```
*if,ANSINTER_,ne,0,then
```

```
/eof
```

```
*endif
```

```
solve
```

```
/com ***** Write FE CONNECTORS *****
```

```
CEWRITE,file,ce,,INTE
```

```
/com,*****
```

```
/com,***** FINISHED SOLVE FOR LS 1 *****
```

Annexe B : Feuille de calcul des accélérogrammes de torsion selon la méthode de Lee & Trifunac

Calcul d'accélérogramme de torsion par la procédure de Lee & Trifunac (l'angle d'incidence ne dépend pas de la fréquence)

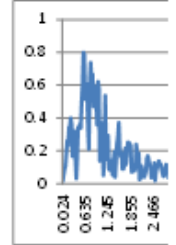
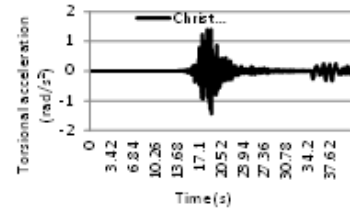
La composante de torsion pour une fréquence donnée :

$$\theta_z = i\omega \frac{\sin\theta_0 v}{v_s} \frac{1}{2}$$

$$\frac{|\phi_{zz}(\omega_n)|}{|v(\omega_n)|} = \frac{\omega_n}{2\beta_{max}} \text{ as } \omega_n \rightarrow \infty$$

$$\frac{|\phi_{zz}(\omega_n)|}{|v(\omega_n)|} = \frac{\omega_n}{2\beta_{max}} \text{ as } \omega_n > 0$$

Angle d'incidence θ_0	θ_0	
Vitesse onde de cisaillement (en surface)	v_{min} (m/s)	422
Vitesse onde de cisaillement (en profondeur)	v_{max} (m/s)	3700

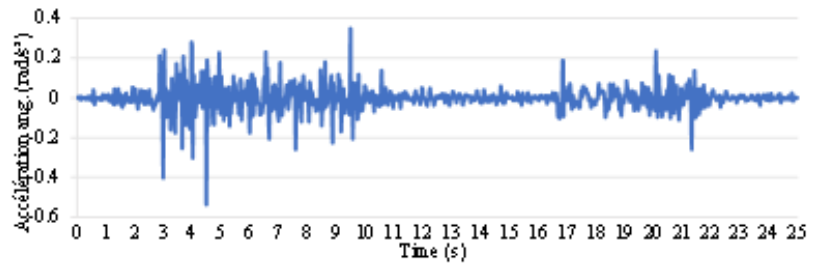


Acc. De translation V(t)	f(Hz)	ω_n	FFT V(t)	Amplitude V (f)	Real		Imag		Spectre de Fourier de torsion ϕ_z
					V(f)*Ratio=	$\omega/2\theta$	V(f)*Ratio=	$\omega/2\theta$	
-0.001	0.024	0.15072	-14.36079	2.038766-05	-0.00029249	0	-0.000292494360648649		
0.001	0.049	0.30772	-9.86904509310178-9.73143137798965i	0.000206466	-0.00203762	-0.002009206	761.898982115-0.002009206i		
-0.001	0.073	0.45844	0.151604641883607-12.3885632829409i	0.019	0.00038312	3.8386E-05	-0.004771082	393.61596247-0.00477108i	
0.001	0.098	0.61544	7.88298544547594-6.71728046571236i	0.078	0.000571218	0.004902903	-0.003837031	027.5051636-0.00383703i	
-0.001	0.122	0.76616	7.93543372095721+1.87888013995349i	0.227	0.000748872	0.005950561	0.00140892	160.52425717+0.00140892i	
0.001	0.146	0.91633	1.70416116711332+5.77471130864399i	0.109	0.000928326	0.001382338	0.005361971	584.6095959+0.00536197i	
-0.001	0.171	1.07333	-5.04707586323714+4.40089357120747i	0.148	0.001144624	-0.00362339	0.004903343	9.390274912+0.00490334i	
0.001	0.195	1.2246	0.669069604592074-4.93560901077574i	0.121	0.001283279	0.000863293	-0.006383117	3323.6123229-0.006383117i	
-0.001	0.22	1.3816	-7.99444363388567-8.04008395281867i	0.061	0.001479377	-0.01182679	-0.011894313	379.34549033-0.01189431i	
0.001	0.244	1.53232	25.4061201062649+11.2126454893234i	0.166	0.001659031	0.042124131	0.018390912	130.9986286+0.01839091i	
-0.001	0.269	1.68932	-9.82308689027131-13.8831393176046i	0.473	0.001844129	-0.01811504	-0.025602289	303.8951442-0.025602289i	
0.001	0.293	1.84004	8.17724510597294+5.17625610407008i	0.523	0.002022783	0.016340793	0.104704435	379.34548732+0.10470443i	
-0.001	0.317	1.99076	-27.7718675346241-38.2413612863818i	0.58	0.002201437	-0.06113803	-0.084185959	302.52810999-0.08418595i	
0.001	0.342	2.14776	-13.888604308377+40.0849425578119i	0.177	0.002387355	-0.03315933	0.09570422	95.34551756+0.09570422i	
-0.001	0.366	2.29848	-14.5667481228449-69.0097826324785i	0.54	0.00256619	-0.03738104	-0.177092183	103.73123902-0.17709218i	
0.001	0.391	2.45548	10.823480554524+8.31790992366959i	0.17	0.002732288	0.029789332	0.022893281	332.2403187+0.02289328i	
-0.001	0.415	2.6062	30.6796059501176-4.13537217633289i	0.265	0.002930942	0.089920141	-0.112120534	3141.3809289-0.11212053i	
0.001	0.439	2.75692	23.4833268362273+24.6719759686111i	0.238	0.003109596	0.07302386	0.076719879	166.00973833+0.07671987i	
-0.001	0.464	2.91392	29.0327973349752+10.6654142067758i	0.018	0.003293694	0.09368322	0.035148943	220.0161278+0.03514894i	
0.001	0.488	3.06464	-17.4311291933905+29.8133379367599i	0.582	0.003474348	-0.06056181	0.10358192	18.143327743+0.10358192i	
-0.001	0.513	3.22164	12.7959149878206+3.44742961749691i	0.867	0.003660446	0.046838761	0.012619131	761.1603367+0.01261913i	
0.001	0.537	3.37236	-23.4875155044778+1.25721293159141E-00	0.753	0.003839101	-0.09017093	4.82657E-05	34.6993804+0.000048265i	
-0.001	0.562	3.52936	35.1036592343736+9.9574046471272i	1.109	0.004025159	0.141299203	0.040080532	320.3289388+0.04008053i	
0.001	0.586	3.68008	-9.09791201298406-1.67419025539594i	1.181	0.004203833	-0.03824628	-0.00703805	328.35283265-0.00703805i	
-0.001	0.61	3.8308	31.5454584003181+55.7159927009665i	0.768	0.004382507	0.138248194	0.244175731	81.93794413+0.24417573i	

Annexe C : Feuille de calcul des accélérogrammes de torsion en fonction de l'angle d'incidence

Calcul d'accélérogramme de torsion par la procédure de Lee & Trifunac (angle d'incidence ne dépendant pas de la fréquence)

Vitesse de cisaillement VS (cm/s)	30.000
angle d'incidence alpha	1.04666667



T(s)	acc L (E-W)	acc T (N-S)	acc L	acc T	acc torsion (rad/s²)
0	0	0	0	0	0
0.01	-1.467	-5.343	227.65	-35.45	0.004968959
0.02	0.809	-5.697	109.1	129.1	0.003271152
0.03	3.088	-8.052	-9.5	293.7	0.001574512
0.04	2.991	-3.115	-82.8	169.8	-0.000849843
0.05	2.896	-0.178	-156.15	45.9	-0.003275337
0.06	1.335	0.281	-8.05	-100.25	-0.000794546
0.07	-0.227	0.74	140.1	-246.45	0.001687078
0.08	1.174	-1.724	180.8	-68.95	0.00369602
0.09	2.575	-4.189	221.55	108.6	0.005706406
0.1	4.79	-3.103	31.4	98.85	0.00131764
0.11	7.006	-2.017	-158.85	89.1	-0.003073402
0.12	5.418	-1.126	-329.8	90.5	-0.006957038
0.13	3.829	-0.235	-500.75	91.9	-0.010840674
0.14	-1.178	0.684	-86	13.3	-0.001876944
0.15	-6.186	1.603	328.8	-65.3	0.007087925
0.16	-2.898	0.95	158.55	34	0.003817162
0.17	0.39	0.297	-11.7	133.3	0.000546399
0.18	0.273	1.63	-26.8	-48.65	-0.000906818
0.19	0.156	2.963	-41.85	-230.6	-0.002358897
0.2	-0.263	0.657	27.9	-52.05	0.000317855
0.21	-0.681	-1.649	97.65	126.55	0.002994912