

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



UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Structure

CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTEME D'ISOLATIONSISMIQUE A LA BASE

Par

MOHAMED KHELLADI

Devant le jury composé de :

Pr BRAHMA ABDELMALEK	U de Blida 1	Président
Dr ABDESSEMED MOULOUD	U de Blida 1	Examineur
Pr LAMRI BELKACEM	U. de Chlef	Examineur
Dr KIBBOUA ABDERRAHMANE	C.G.S Alger	Examineur
Dr ALLICHE MOUNIR	U de Médéa	Examineur
Pr ABED MOHAMED	U. de Blida 1	Directeur de Thèse

Blida, 2021

REMERCIEMENTS

Je ne sais comment remercier le Bon Dieu le tout Puissant le Miséricordieux qui m'a donné le courage, la volonté et l'amour de la science pour me permettre d'arriver à ce stade.

Je tiens à remercier vivement et profondément le Professeur Mohamad ABED directeur de thèse pour avoir dirigé ce travail de recherche et que je lui exprime ma grande gratitude.

Je tiens à exprimer mes remerciements au professeur Abdelmalek BRAHMA d'avoir accepté de présider ma soutenance de thèse

Je tiens à remercier notre cher professeur Belkaceme LAMRI d'avoir accepté d'examiner ma thèse.

Je tiens également exprimer mon profond respect, mes remerciements et ma reconnaissance aux Docteurs Mouloud ABDESSEMED, Abderrahmane KIBBOUA et Mounir ALLICHE d'avoir accepté d'examiner ma thèse.

Je tiens encore à remercier le Dr Mourad BACHENE, Dr Rédha RABHI et le Dr Mohamed HBIRECHE pour leurs aides précieuses dans le domaine mécanique

Je remercie l'équipe du laboratoire de Géo-matériaux et Génie-civil et les enseignants du département de Génie-civil de l'université de Blida 1.

Je tiens à remercier beaucoup les enseignants du département de Génie-civil ainsi que les enseignants et le staff de la faculté de la technologie de l'université de Médéa.

Je tiens à remercier beaucoup encore l'Ingénieur en Mécanique le tourneur Kamel Mokadem et le menuisier monsieur Hamid BAHA de m'avoir aidé à réaliser le modèle réduit du système d'isolation sismique à la base..

المخلص

تم اقتراح تصميم نظام عزل أساسي جديد في هذا البحث بهدف أن لا يقوم النظام بإرسال أي قوة إلى الهيكل تحت التحميل الأفقي. حيث يجب أن يظل الهيكل جاهزاً للعمل وثابتاً. قبل التحقيق من المشكلة الديناميكية لنظام العزل الأساسي يمكن حل مكونات العزل للنموذج باستخدام الحل تحليلي مع طرق المختلفة.

من أجل حساب تشوه أي عنصر للعزل يحتوي الحمل الرأسي الانضغاط ، يركز التحليل على منطقة عدم الاستقرار الأولية لتحديد جميع معلمات التشوهات التي يمكن أن تؤدي إلى معاملات الاحتكاك. تقع هذه المنطقة عند نقطة اتصال التفاعل بين العناصر. يعتمد التصميم على نقطة الاتصال التي طورتها طرق مختلفة.

في هذه الدراسة ، يمكن لطرق التحليل الرياضي باستخدام الصيغ حساب الأبعاد والتشوهات المختلفة لعناصر النظام والتي يتم التحقق منها باستخدام تحليل العناصر المحدودة ANSYS. بعد التأكد من الأبعاد الكافية للأجزاء المختلفة من نظام المعزل من التحليل ، يمكن تطبيق النظام على الهيكل.

هذه التقنية يمكن أن تقلل إلى حد كبير من عمليات النزوح والتسارع على مستوى الأرض مع نظام عزل زلزالي جديد ، وهو نظام غير منفصل بين الهيكل وتحت الأرض.

ABSTRACT

The design of a new base isolation system is proposed in this research with the objective that the system does not transmit any force to the structure under horizontal loading. The structure must remain operational and steady. Before investigating the dynamics problem of the base isolation system, the isolator components of the model can be solved analytically using different approaches.

In order to calculate the deformation of any element of the isolator due to a compressive vertical load, the analysis focuses on the primary instability region to determine all deformations parameters, which can lead to frictions coefficients. This region is located at the interaction contact point between the elements.

The design is based on the contact point developed by different approaches. In the present study, the mathematical analysis methods by using formulations can calculate the different dimensions and deformations of the elements of the system and which are verified using ANSYS finite element analysis. After ensuring the adequate dimensions of the different parts of the isolator system from the analysis, the system can be applied on the structure.

This technique can reduce significantly the displacements and accelerations at the underground level with a new seismic isolation system, which it is an uncoupled system between the structure and the underground.

Keywords:isolation system, horizontal loading, deformation, interaction, finite element, displacement, acceleration, underground level, uncoupled system.

RESUME

La conception d'un nouveau système d'isolation à la base est proposée dans cette recherche avec l'objectif que le système ne transmette aucune force à la structure sous charge horizontale. La structure doit rester opérationnelle et stable. Avant d'étudier le problème de dynamique du système d'isolement à la base, les composantes du modèle de l'isolateur peuvent être résolues analytiquement en utilisant différentes approches.

Afin de calculer la déformation de n'importe quel élément de l'isolateur due à une charge verticale de compression, l'analyse se concentre sur la région d'instabilité primaire pour déterminer tous les paramètres de déformation qui peuvent conduire à des coefficients de frottement. Cette région est située au point de contact d'interaction entre les éléments. La conception est basée sur le point de contact développé par différentes approches.

Dans la présente étude, les méthodes d'analyse mathématique à l'aide de formulations permettent de calculer les différentes dimensions et déformations des éléments du système celles-ci sont vérifiées à l'aide de l'analyse par éléments finis ANSYS. Après avoir vérifié les dimensions adéquates des différentes parties du système d'isolateur à partir de l'analyse, le système peut être appliqué sur la structure. Avec un nouveau système d'isolation sismique à la base découplé entre la structure et le sous-sol, cette technique peut réduire considérablement les déplacements et accélérations au niveau de ce dernier.

Mots-clés : système d'isolation, charge horizontale, déformation, interaction, éléments finis, déplacement, accélération, niveau sous-sol, système découplé.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Résumé (en Arabe)	
Résumé	
Abstract	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des illustrations et des abréviations	
Introduction générale	14
CHAPITRE 1	
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET SYTEMES D'ISOLATION SISMIQUE	
1 Introduction	17
1.1 Historique sur les systemes d'isolation sismique	18
1.2. Evaluation des séismes échelle macroscopique	19
1.3 Le phénomène physique	19
1.4 Qu'est-ce que la construction parasismique	20
1.5 Approche global des ouvrages	20
1.6 Implantation des ouvrages	21
1.7 Comportement des structures à l'action sismique	22
1.8 Amortissements	23
1.9 Systemes d'isolateur sismique	24
1.10 Isolation parasismique	27
1.10.1 Principe	27
1.10.2 Comportement des isolateurs	27
1.11 Conclusion	31

CHAPITRE 2

CLASSIFICATION DES DIFFERENTS TYPES D'ISOLATEUR

2.1 Introduction	32
2.2 Types d'appuis parasismiques	32
2.2.1 Systèmes d'isolation sismique passifs	32
2.3 Appuis elastomers simples LDRB « Low Damping Rubber Bearings »	33
2.3.1 Appui à déformation	33
2.3.2 Exemple de confortement d'appuis parasismiques d'un cylindre à gaz liquide	36
2.3.3 Appui élastomères fretté avec plots en plomb. (HDBR High Damping Rubber Bearings)	39
2.3.4 Appuis à déformation et glissement	41
2.3.4.1 Appui à glissement ou à frottement pur	41
2.3.4.2 Appuis à déformation et glissement	46
2.3.4.3 Appuis à roulements	47
2.3.4.4 Appui balancé à fréquence variable	48
2.4 Conclusion	52

CHAPITRE 3

CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTEME D'ISOLATION ET PROCEDURE TECHNIQUE DE MODELISATION DU SYSTEME

3.1 Introduction	53
3.2 Intervenants du système d'isolation	53
3.3 Différent cas du système d'isolation	54
3.4 Mesure de l'efficacité du système d'isolation	54
3.5 Conception et description du modèle	56
3.6 Composition et structure du modèle	57
3.7 Protection et étanchéité du modèle	59
3.7.1 Protection sans frottement	59
3.7.2 Les joints à frottements	60
3.8 Composantes des systèmes d'isolation à la base	60
3.9 Techniques de modélisation du système d'isolation	61
3.9.1 Méthodes d'analyse du modèle	61
3.9.2 Analyse analytique	62
3.10 Mécanique du contact et de l'impact	62

3.11 Contact sphère plans	63
3.11.1 Contact élastique	63
3.11.2 Contact élastoplastique	64
3.12 Simulation de l'impact par calcul numérique	65
3.13 Caractéristiques de l'acier 100Cr6	71
3.14 Caractéristiques mécaniques	72
3.15 Analyse élastique	72
3.16 Approche par éléments finis	73
3.17 Résultats et discussion	75
3.18 Résultats analytiques	76
3.19 Résultats des analyses élastiques	76
3.20 Résultats éléments finis	76
3.21 Conclusion	77

CHAPITRE 4

CARACTERISTIQUES MECANQUES ET COMPOSITION CHIMIQUE DES ELEMENTS

4.1 Introduction	78
4.2 Caractéristique mécanique des éléments	78
4.3 Composition chimique des éléments	79
4.4 Propriétés	79
4.5 Microstructure de l'acier 100Cr6	80
4.6 Désignation de l'acier 100Cr6	80
4.7 Résistance à l'usure et coefficient de frottement	81
4.8 Traitement du matériau	82
4.9 Choix des paramètres des traitements thermiques	82
4.9.1 Les conditions de trempe	82
4.9.2 Aptitude à la trempe	83
4.9.3 Le revenu	84
4.9.4 Endommagement du film sous contraintes de traction et compression	85
4.10 Phénomène de cloquage dans les films	87
4.11 Forme de Cloque	87
4.12 Données techniques sur l'acier 100Cr6	90
4.13 Critères de conception du modèle d'isolation	90
4.14 Conclusion	91

CHAPITRE 5
CONCEPTION, CALCUL ET PERFORMANCE DES BATIMENTS AVEC SYSTEME
D'ISOLATION A LA BASE

5.1 Introduction	92
5.2 Application du modèle à la structure	92
5.3 Solution de structure	92
5.4 Configuration de la structure fixée à la base	93
5.5 Etude analytique et Solution	95
5.6 Configuration et application pratique de la base isolée	99
5.7 Détails du concept de la base d'isolation	102
5.8 Conclusion	105
Conclusion générale	106
Recommandations	109
Références Bibliographiques	110

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Base Isolation System (Takenaka Corporation 2001)	27
Figure 1.2 : Base Isolation System sur différentes localisation	29
Figure 1.3 : Isolateur System en plein mouvementlatéral	30
Figure 1.4 : Oscillation de la structure avec isolateurs Oscillation de la structure sans isolateurs	30
Figure 1.5 : Un des ouvrages stratégique à préserver par insertion de système d'isolation	31
Figure 1.6 : Ouvrages stratégique modélisé avec et sans isolateur	31
Figure 2.1 : Isolateur en élastomère posé sur un socle de fondation	34
Figure 2.2 :Système d'appui sans plomb	35
Figure 2.3 : Appuis parasismiques en élastomères fretté	36
Figure 2.4 : Isolateur boulonné au socle de la fondation	37
Figure 2.5 : Réservoir de gaz posé sur socle circulaire	37
Figure 2.6 : Réservoir de gaz posé sur isolateur inséré sur les socles	38
Figure 2.7 : L'isolateur du réservoir de gaz liquide vue de près	38
Figure 2.8 : Isolateurs utilisés au niveau des poteaux élancés des ponts	39
Figure 2.9 : Confortement par Insertion des isolateurs à haut pouvoir amortisseurs au niveau des culées d'un pont	39
Figure 2.10 : Isolateur à base d'élastomère avec noyau de plomb	40
Figure 2.11 : Déplacement constant dû à un résidu de force d'inertie transmise par l'Isolateur et une oscillation d'une structure fixée	40
Figure 2.12 : Déplacement constant dû à un résidu de force d'inertie transmise par l'Isolateur d'une même structure qui oscillait lorsqu'elle était fixée	41
Figure 2.13 : Plaques de glissement supérieures doivent être plus grande que celles des plaques inférieures	42
Figure 2.14 : Détails de l'Isolateur à glissement	43
Figure 2.15 : Principe de fonctionnement de l'isolateur à glissement sous chargement horizontal	43
Figure 2.16 : Modèle d'appui à glissement utilisé dans le projet de la grande Mosquée d'Alger	44
Figure 2.17 : Socle en béton posé sur radier conçus et réalisés spécialement pour les appuis à glissement (grande Mosquée d'Alger)	45

Figure 2.18 : Appui à glissement posé sur un socle (niveau vide sanitaire)	45
Figure 2.19 : Plaques de friction (PF – « Pure Friction sliding joint »)	46
Figure 2.20 : Appui à élastomère fretté en caoutchouc ou néoprène. Déplacement horizontal entre la structure et les fondations par distortion	46
Figure 2.21 : Mode de fonctionnement des appuis glissants	48
Figure 3.22 : Appui à roulement	48
Figure 2.23 : Portique en charpente métallique posé sur table vibrante supporté par un appui PRB	48
Figure 2.24 : Résultats donnés par test à la table vibrante (accélérogramme)	48
Figure 2.25 : Photo type appui PRB	49
Figure 2.26 : Appui à balancement à fréquence variable posé entre superstructure et fondation	49
Figure 3.1 : Allures des spectres d'accélération moyenne pour différents type de sols	55
Figure 4.2 : Plaque inférieure en acier présentant des concavités	56
Figure 3.3 : Coupe aux niveaux des concavités	56
Figure 3.4 : Les différents éléments	56
Figure 3.5 : Eléments de l'isolateur en perspective	56
Figure 3.6 : Billes sphériques à l'intérieur des formes concaves de la plaque inférieure	57
Figure 3.7 : Lubrifiant et billes en acier à l'intérieur des formes concaves	58
Figure 3.8 : Différent élément de l'isolateur	60
Figure 3.9 : Illustration de la répartition des pressions et déformations au niveau des points de contact	61
Figure 3.10 : Dimension des déformations au niveau des points de contact	62
Figure 3.11 : Définition des domaines élastique, élastoplastique et plastique	63
Figure 3.12 : Les rayons de courbure selon trois dimensions des éléments du modèle	66
Figure 3.13 : Déformation de la partie supérieure de l'isolateur de : soit la tôle ou soit la bille	67
Figure 3.14 : Déformation de la partie inférieure de l'isolateur de : soit la tôle ou soit la Bille	67
Figure 3.15 : Variation des diamètres des billes sphériques en fonction des chargements $dT = f(D)$	69
Figure 3.16 : Courbe contrainte déformation	71
Figure 3.17 : Perspectives des différents nœuds	71
Figure 3.18 : Maximum des nœuds des éléments	71

Figure 3.19 : Déplacement total (mm)	72
Figure 3.20 : Contrainte principale normale (MPa)	72
Figure 3.21 : Déformation élastique des éléments (mm/mm)	73
Figure 4.1 : 100 Cr 6 recuit	78
Figure 4.2 : Courbe indiquant la température adoptée à la teneur en carbone	79
Figure 4.3 : Courbe TRC 100Cr6	80
Figure 4.4 : Cycle de traitement réalisé sur l'acier	81
Figure 4.5 : Diagramme de Revenu Acier 100Cr6	82
Figure 4.6 : Film et substrat des éléments de l'isolateur après traitement thermique	82
Figure 4.7 : coupe métallographique (microfissuration sur la périphérie de l'acier)	83
Figure 4.8 : Fissures sur film/substrat au niveau de chaque élément de l'isolateur	83
Figure 4.9 : Différentes forme de cloques au niveau de chaque élément de l'isolateur	85
Figure 4.10 : Les cloques diminuent au fur et à mesure de la dureté	85
Figure 4.11 : Mesure du pourcentage de la surface cloquée dans l'empreinte	86
Figure 5.1 : Plan de niveau de structure conventionnelle	90
Figure 5.2 : Plan de coffrage de fondation de la structure conventionnelle	90
Figure 5.3: Modélisation de différentes hauteurs de structures fixées avec premier mode de déplacement	91
Figure 5.4 : Modèle mathématique d'une structure à plusieurs niveaux sur appuis isolés	93
Figure 5.5 : Modèle mathématique d'un portique sur appui isolé	94
Figure 5.6 : Premier mode de déplacement d'une structure fixée et isolée	95
Figure 5.7 : Plan de coffrage de fondation pour une structure isolée	96
Figure 5.8 : Position du système d'isolation au niveau des socles des fondations	96
Figure 5.9 : Coupe longitudinale au niveau des socles de fondation	97
Figure 5.10 : Coupe longitudinale du voile de contreventement au niveau d'un socle de fondation	98
Figure 5.11 : Position de l'isolateur au niveau du socle (vide sanitaire) et existence des des amortisseurs	98
Figure 5.12 : Type de Système d'amortissement le plus utilisé	99
Figure 5.13 : Configuration détaillée du système d'isolation	99
Figure 5.14 : Détail de chaque élément de l'isolateur	100
Figure 5.15 : Vue d'en haut de la Plaque inférieure présentant des formes concaves avec le Système de fixation	100
Figure 5.16 : Plaque supérieure fixée au droit de chaque poteau au niveau du plancher haut	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 6.1 : Résultats des caractéristiques mécaniques des éléments de l'isolateur par utilisation du logiciel ANSYS 12.0	76
Tableau 6.2: Composition chimique des différentes parties de l'isolator (100Cr6 comme matériau adopté)	77
Tableau 6.3: Norme et désignation de l'acier	78
Tableau 6.4 : Valeurs de la trempe à l'huile (auténisation) et de revenu par réchauffement	81
Tableau 7.1: Weights and displacements of different structures according of seismic zone	94

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

T	Période d'oscillation du système
M	Masse du plancher
K	Rigidité équivalente du système
G	Module de cisaillement
S	Surface
H	Hauteur d'étage
HDRB	Système d'isolateur (High Damping Rubber Bearings)
LDRB	Système d'isolateur (Low Damping Rubber Bearings)
PF	Plaque de friction
FPS	Friction pendulum system
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
X(t)	Déplacement en régime permanent
P ₀	Amplitude d'excitation
λ	Facteur d'amplification dynamique
F _C	Force d'amortissement
F _K	Force de rigidité équivalente du système
F _T	Résultante des forces
ξ	Coefficient d'amortissement
β	Rapport de fréquence
ω	Fréquence d'excitation
T _R	Transmissibilité
X _T	Déplacement total (sol + structure)
X _S	Déplacement du sol
X _R	Déplacement relatif à la structure
X _{S0}	Amplitude du déplacement du sol
\ddot{X}_r	Accélération relative du mouvement de la structure
\dot{X}_r	Vitesse relative du mouvement de la structure
X _r	Déplacement relatif du mouvement de la structure
dT ₁	Déformation des éléments tôle et bille au niveau supérieur
dT ₂	Déformation des éléments tôle et bille au niveau inférieur

Z_1, ω_1	Déformation due à l'influence de la bille sur la tôle
Z_2, ω_2	Déformation due à l'influence de la tôle sur la bille
dT	Déformation totale
$tg\alpha$	Tangente de l'angle
ε	Déformation
σ_{el}	Contrainte limite élastique
a	Zone circulaire de la déformation
P	Effort normal
P	Module de Poisson
E	Module d'élasticité (Module d'Young)
P_{max}	Pression maximale
D	Diamètre de la sphère
C	Atome de carbone
S	Silicium
Mn	Manganèse
P	Phosphore
S	Soufre
Cr	Chrome
Mo	Molybdène
$(Cr, Fe)_3C$	Carbure de chrome
Re	Résistance élastique
Rm	Résistance maximale à la traction
Rr	Résistance à la rupture
HRC	Dureté Rockwell Conique
$X\ddot{g}$	Accélération du mouvement du sol

INTRODUCTION GENERALE

Le grand public trouve naturel de profiter des progrès de la technologie, c'est pourquoi il exige des concepteurs des réalisations toujours moins coûteuses, fiables et leurs maintenances faciles à la suite d'un séisme.

C'est ainsi que les conceptions de la plupart des structures exigent à présent la détermination de leurs réponses aux sollicitations de nature dynamique qu'elles sont amenés à rencontrer au cours de leurs existence.

L'objectif que se fixe le génie-civil est de caractériser le comportement des structures soumises à des sollicitations dynamiques rencontrées dans la réalité.

La technologie de l'isolateur sismique répond remarquablement bien à cet objectif en réussissant parfaitement à présenter un nouveau concept de protection structural, une vue synthétique de la théorie moderne et souligné les applications à des problèmes pratiques auxquels les concepteurs se trouvent confrontés.

Malgré les recherches effectuées dans ce domaine, plusieurs questions restent soulevées quant au comportement des structures isolées.

La méthode innovante de ses dernières années d'actualité importante, efficace et en même temps fiable permet de protéger les structures par des systèmes de protection en réduisant la réponse des structures soumises à des chargements horizontaux.

Ces dispositifs permettent de découpler le mouvement du sol de la structure, des piles et des culés des poutres de ponts, au niveau des contreventements des structures en charpente métallique etc. Cela dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière, l'isolateur capte les déformations inélastiques et filtre les accélérations émanantes du sol de sorte que la superstructure isolée se déplace selon un mode rigide subissant de très faibles accélérations, presque pas de déformation et en mettant à néant les paramètres qui influent sur le comportement de la structure.

L'efficacité du système s'agrandit au fur et à mesure de la différence entre sa rigidité horizontale et celle de la superstructure, car c'est cette différence qui affaiblit l'accélération communiquée à la structure. Cette accélération réduite par le système ne peut réaliser qu'un très faible mode fondamental d'oscillation, par contre la participation des modes supérieurs au mouvement s'avèrent en général aussi très très faible.

Le système doit se poser là où se localisent principalement les déplacements horizontaux imposés à la structure par des secousses latérales du sol et il est conçu pour supporter ces déplacements sans dommages. En d'autres termes le système doit être placé sous le point ou

au droit de la charge verticale ou au droit des intersections où se localisent des éléments porteurs de la structure.

Le plancher immédiatement au-dessus des fondations doit impérativement être constitué comme un diaphragme rigide afin d'assurer une répartition correcte des charges entre les appuis.

Grâce à sa faible rigidité, la période propre de la construction s'allonge et la vitesse d'oscillation ainsi que l'accélération transmise à la structure diminuent. Ce système agit donc comme un filtre qui traite toutes les vibrations de différentes périodes.

Ce système, appelé appui parasismique, isolateur ou dissipateur d'énergie, il est placé entre les fondations et la superstructure ou entre le sous-sol et le rez-de-chaussée et peut même être placé entre les ouvrages d'une structure, c'est-à-dire entre planchers. Un espace accessible suffisant doit être prévu au niveau de ce système pour permettre la protection, maintenance et le remplacement éventuel des éléments du système que l'on juge défectueux.

Le fait que ce système permet une réduction de la réponse d'une structure aux chargements horizontaux, il résout directement la problématique de l'influence des formes architecturales à savoir :

- la volumétrie de la construction, l'élancement, le site, le sol et la zone;
- les irrégularités en plan et en élévation;
- les dispositions des circulations verticales (escaliers, ascenseur, patios etc.) ;

Ces facteurs fondamentaux sont à l'origine des problèmes de structure qui ne permettent pas aux bâtiments de s'équilibrer, c'est-à-dire que la distance entre le centre des éléments porteurs et le centre des éléments portés existe et ces derniers ne peuvent pas chevaucher ou satisfaire les conditions des règles parasismiques Algériennes.

Par conséquent la rotation s'impose dans chaque niveau de plancher et se manifeste à la moindre sollicitation horizontale caractérisant la sensibilité des structures à la torsion. A cet effet les recherches ont permis à la technique des appuis parasismique de se développer, de justifier le coût des constructions, de pouvoir rester fixe, en état de service et sans le moindre des mouvements c'est-à-dire qu'il préserve la fonctionnalité de l'ouvrage après séisme et qui devient une grande protection pour les constructions stratégiques et autres. C'est ce qui a motivé notre recherche sur un système d'isolation qui anéanti complètement le chargement horizontal à la base.

Des constructions abritant des activités primordiales pour la sécurité de la population ou bien des installations dangereuses, parallèlement aux techniques parasismiques fondées sur l'obtention d'une capacité de déformation ductile des structures bien que classiques,

continuent à faire l'objet de développements techniques et concernent, sans doute encore la grande majorité des vieilles constructions à préserver et monuments à conserver.

Le système d'isolation qu'on propose d'étudier va résoudre cette problématique et l'émergence de cette nouvelle technologie récente est grandement justifiée par l'aspect économique qu'elle réalise sur le coût de la construction de l'ouvrage.

Suite à une introduction générale, cette modeste thèse va être présentée en cinq chapitres. Le premier chapitre comporte une étude bibliographique sur les différentes recherches et notions fondamentales relatives aux systèmes d'isolations sismiques.

Ces derniers font aussi partie d'une analyse bibliographique à savoir l'historique et le comportement des différents isolateurs.

Le deuxième chapitre, a été consacré à la classification des différents types d'isolateurs, conception, essai aux laboratoires, adaptation aux ouvrages et exemple de confortement sur des ouvrages déjà réalisés.

Troisième chapitre, concerne la conception d'un système d'isolation à la base et procédure technique de modélisation du système. Par mesure d'efficacité, ce chapitre présente une analyse au préalable de comportement technique considérable pour garantir la fiabilité des résultats et la prise en compte de la non linéarité du système et cela afin de concevoir un nouveau système d'isolation à la base.

C'est la procédure et méthodes de calculs au concept, c'est comment trouver une analyse mathématique adéquate pour une telle conception, afin d'opter pour une proposition de formulation de calcul en conséquence et enfin une confirmation du comportement par analyse en éléments finis moyennant le logiciel ANSYS.

Dans ce quatrième chapitre on présente les caractéristiques mécaniques, la composition chimique des éléments de l'isolateur ainsi que comportent les éléments sous l'effet de la charge verticale. Il est également question du contrôle de la performance par les différents types de traitements thermomécaniques.

Dans le cinquième chapitre, c'est la conception, le calcul et la performance des modèles de bâtiments avec système d'isolation à la base. Cela est réalisé par l'exploitation et la synthèse des résultats du modèle. Une application du modèle à la base d'une structure est donnée par une présentation détaillée du modèle.

Enfin on termine ce modeste travail par une conclusion générale suivie d'une recommandation pour d'éventuelle application du modèle.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET SYSTEMES D'ISOLATION SISMIQUE

1 Introduction

Dans ce chapitre on présente une recherche bibliographique et les différents systèmes d'isolation sismique à la base et leurs procédés de dissipations d'énergie sismique, ce qui va démontrer les bénéfices de cette technologie.

Le principe de l'isolation sismique n'est pas récent et l'innovation du système d'isolation ne date pas d'hier ; les premières expériences remontent au début du 20eme siècle. Cette technique des appuis parasismiques, dont il existe plusieurs types qui suscite beaucoup d'intérêt dans la plus part des pays concernés où la sismicité est très répandue ou répertoriée à haut risque sismique.

La première application de la technologie moderne de l'isolateur sismique a été réalisée en 1969, sur une école élémentaire à Skopje (Yougoslavie).

Au Canada (Kelly, 1979 ; Robinson, 1982 ; Pall et Marsh, 1982). Des bâtiments à isolateurs sismiques à Nothridje en 1995 et à Kobe en 1994 ont résisté aux différents séismes correspondants à ces dates. La conception des systèmes d'isolation sismique en Taiwan était en progression durant le séisme de l'année 1999 ; Chichi et Chopra 2001 de même l'hôtel de ville de Salt Lake City (Utah, États-Unis) et le bâtiment de la mairie de Hayward ont (Californie) été posé sur le même type d'isolateur.

1.1 Historique sur les systemes d'isolations sismiques.

Les tremblements de terres ont représenté toujours un des plus graves désastres de l'humanité. Leur appaition brutale et imprévue, la violence des forces horizontales mises en jeu, l'importance et l'énormité des pertes de vies humaines et matériels ont marqué la mémoire des générations. Parfois l'estimation des dommages sont comparables à un budget national annuel qui sera en mesure d'engendrer une grave crise économique, ou au moins une brusque diminution du niveau de vie de toute une population [1].

Les déplacements du sol pendant un séisme dépendent de l'intensité et des conditions du site. Dans les sols rocheux, les déplacements sont aux environs de l'ordre de quinze fois plus faible

que dans les sols peu constants pour la même intensité car le sol absorbe de l'énergie selon sa rigidité ou sa nature.

Les tremblements de terre de forte intensité, surtout leurs funestes conséquences ont servi et servent encore à ranimer l'intérêt porté. Le devoir aux chercheurs et concepteurs de prévoir des mesures de protections antisismiques dans les ouvrages afin d'assurer et de confirmer la garantie antisismique des structures. C'est à la suite de la deuxième moitié du dernier siècle que les premières échelles pour l'estimation de la force sismique ont été créées et certaines règles de constructions dans les régions sismiques ont été élaborées.

La France a été aussi parmi les pionniers en la matière puisque ses premières réalisations remontent à la fin des années 70; il s'agit du lycée de Lambesc (épicentre du séisme provençal du 11 juin 1909) construit en 1977 en utilisant le système d'appuis « Gapec » développé par G.Dalfosse (CNRS de Marseille) et de la centrale nucléaire de Cruss-Meysse dans la vallée du Rhône, dont les travaux ont commencé à la même époque et à Mexico (1974) et des réalisations néo-zélandaise (immeuble de bureaux et grande cheminée d'une usine) au début des années 80.

Au Canada (Kelly, 1979 ; Robinson, 1982 ; Pall et Marsh, 1982). Des bâtiments à isolateurs sismiques à Nothridje en 1995 et à Kobe en 1994 ont résisté aux différents séismes correspondants à ces dates. La conception des systèmes d'isolation sismique en Taiwan était en progression durant le séisme de l'année 1999 en Chichi, et Chopra, 2001 de même l'hôtel de ville de Salt Lake City (Utah, États-Unis) et le bâtiment de la mairie de Hayward ont (Californie) été posé sur le même type d'isolateur.

1.2 Evaluation des séismes échelle macroscopique

A l'heure actuelle, l'utilisation d'une instrumentation de précision a été largement développée pour étudier l'action mécanique des séismes. C'est essentiellement sur la base du dépouillement systématique des données instrumentales que l'on a pu faire apparaître certaines constantes ou similitudes dans les mécanismes du foyer ou la propagation des ondes sismiques.

Des accélérogrammes nous fournissent des renseignements importants des différents enregistrements tels que les déplacements, vitesses et accélérations du sol durant les sollicitations sismiques. Les renseignements des séismes de forte intensité ont une importance particulière, c'est pour cette raison que les pays de haute sismicité sont équipés d'un réseau de stations sismologiques munis d'appareils spéciaux et de logiciels très puissants comme station de calcul.

Au centre de recherches Kobori à Tokyo des applications ont été menées pour mettre au point la bonne maîtrise de la réponse des bâtiments au séisme en proposant un bâtiment dynamique intelligent modèle [2].

1.3. Le phénomène physique

Les séismes majeures sont liés à l'existence de mouvements tectoniques globaux continuellement en action qui soulèvent des chaînes de montagnes et creusent des tranchées océaniques à la surface de la terre.

Ces mouvements affectent une quinzaine de plaques sphéroïdales et entendent des contraintes sur les lignes de contact des plaques. Lorsque ces contraintes deviennent trop élevées et supérieure à la résistance au frottement, une rupture brutale se produit : c'est un tremblement de terre, à la suite duquel un nouvel état de stabilité est réalisé.

Il résulte de cette description qu'il existe des régions du monde à plus ou moins à haut risque sismique selon la distance qui les sépare des zones de jonction des plaques.

Un paramètre utile pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est le déplacement maximal du sol, qui donne une idée sur l'ordre de grandeur du déplacement relatif du centre de gravité de la structure par rapport à la base de structure (quelque centimètre en zone faiblement sismique jusqu'à un mètre en zone à très forte sismicité).

1.4 Qu'est-ce que la construction parasismique

La seule prévention valable en zone à risque sismique est la construction parasismique, c'est-à-dire l'art de construire de manière telle que les bâtiments, même endommagés, ne s'effondrent pas et cela afin d'éviter en premier lieu les pertes de vies humaines et le maintien en activité surtout les ouvrages stratégiques qui sont les éléments qui déterminent le choix du niveau de protection, qui est le minimum exigé par les règles parasismiques. Dans tous les cas, la meilleure façon d'envisager des constructions parasismiques consiste à formuler des critères qui doivent assurer à la fois la sécurité, la stabilité et une économie justifiée.

1.5 Approche global des ouvrages

L'approche globale doit prendre en considération tous les facteurs pouvant avoir une incidence sur le comportement des ouvrages. L'étude parasismique s'intéresse donc au site, aux fondations et à la forme architecturale notamment la structure porteuse. Le comportement des bâtiments lors d'un séisme est influencé d'une manière importante par leur forme qui est une problématique à résoudre.

Certaines configurations amplifient considérablement les sollicitations d'origines sismiques, créent une rotation lors du premier déplacement, de mauvaises conditions de résistance et notamment à cause des concentrations de contraintes qu'elles favorisent [2]. L'intensité des charges horizontales dépend directement de la nature et de la conception de la structure. Selon le type de leur système porteur, des bâtiments d'aspect extérieur similaire peuvent subir lors d'un même séisme et sur le même sol des charges très différentes.

Tous ces domaines techniques auront des répercussions sur le comportement de l'ensemble. Pour que cette approche ne pose pas de problème de coordination et pour augmenter la fiabilité des constructions parasismiques il suffit d'intégrer à chaque étape de la conception les éléments suivants :

- les enseignements tirés des séismes récents ;
- l'évolution des connaissances et de la réglementation ;
- les résultats des recherches.

L'intégration du système d'isolateur et ensuite l'application des règles parasismiques suivies d'une excellente qualité d'exécution. Ce sont certainement les moyens surs pour conférer aux bâtiments une résistance efficace, assurer le confort et la sauvegarde des vies humaines.

1.6 Implantation des ouvrages

Il est probable que les couches superficielles du sol soient hétérogènes, ou de qualités médiocres. Ce qui a montré par expérience que les conditions du sol ont une incidence majeure sur le degré de dommages sismiques aux différentes constructions.

En général les terrains que l'on rencontre posent des problèmes particuliers pour les fondations des constructions. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les sols rocheux, qui transmettent facilement des vibrations grâce à leurs rigidités et s'avèrent plus favorable que les sols meubles. Ceux-ci donnent lieu à des moments globaux et différentiels de grandes amplitudes et des accélérations importantes dans les basses fréquences.

A la même distance de l'épicentre, l'intensité d'un tremblement de terre peut varier de plusieurs degrés entre zones à sol durs et zones à sols mous ce qui peut rendre vulnérables des constructions fondées sur des sols déformables est d'autant plus grande que leurs fondations est moins profondes.

Les conditions géologiques (lithologie des sols) ont une grande influence sur le caractère de vibrations engendrées par les séismes . On a constaté, selon les sols, prédominant des périodes propres à leur nature géologiques

On peut même dire que les sols se comportent comme une véritable structure ayant sa propre période de vibration en fonction de sa masse et de la rigidité de la formation des couches.

Il s'agit d'une structure complexe de haut degré d'hyperstaticité dont les déformations ne peuvent être évaluées qu'approximativement et à laquelle par conséquent une étude de sol rigoureuse, doit répondre , permette de déterminer l'épaisseur, la classe des sols , de détecter les déformations suspectes de liquéfaction et de connaître l'épaisseur des alluvions jusqu' au substratum rocheux , car les effets de site amplifient souvent les secousses sismiques d'une manière significative en fonction de ces paramètres.

Il est à noter que lorsqu'une construction va être implantée sur un bon sol, il faut s'assurer que son épaisseur est suffisante et qu'elle ne repose pas sur un milieu instable. Les terrains dont la résistance diminue avec la profondeur sont impropres à l'implantation des grands ouvrages parasismiques et cela conformément à l'étude géotechnique. L'intensité des séismes augmente souvent avec l'épaisseur des dépôts sédimentaires du substratum rocheux.

On constate que l'implantation des constructions élancées et les constructions basses souffrent davantage selon les différentes épaisseurs d'alluvions et cette implantation de ces constructions crée la similitude des périodes propres ce qui par conséquent permet aux constructions d'entrer en résonance avec les sols respectifs, car leurs périodes propres

d'oscillations avec celles des sols correspondants étant proches ; et par l'occasion rappelons que la période propre des constructions régulières est égale, en première approximation, à 1/10 du nombre de niveaux [1].

Les concepteurs peuvent, dès la connaissance de l'étude géotechnique du site, vérifier si les structures sont susceptibles d'entrer en résonance avec le sol en cas de séisme, la période propre T_0 des sols homogènes se calculent facilement $T_0 = 4h/v_s$ ou h est la hauteur du sol en mètre pour les différents types de sol et V_s est la vitesse de cisaillement déterminée par l'étude géotechnique.

Prenons par exemples deux types de sols meubles et un sol granulaire compact :

a/ sol meuble, $h=50\text{m}$ et $V_s=100\text{m/sec}$ $T_0=2\text{sec}$.

Conclusion : On peut dire que les structures (bâtiments élancés qui devraient être implantés sur ce site) dont la période propre proche de T_0 sont à éviter car ils peuvent facilement rentrer en résonance.

b/sol meuble, $h=5\text{m}$ et $V_s=100\text{m/sec}$ $T_0=0.2\text{sec}$.

Conclusion : les structures à un ou deux niveaux dont la période propre est proche de 0.2sec pourraient entrer en résonance avec le sol et les conséquences peuvent être graves.

c/ sol granulaire compact, $h=60\text{m}$ et $V_s=500\text{m/sec}$ $T_0=0.48\text{sec}$

Conclusion : les constructions courantes de cinq niveaux devraient être évitées.

Pour aboutir à des conclusions beaucoup plus précises de périodes, il faut que le calcul de période propre d'une structure doit être précis (en conformité avec les prescriptions des règles parasismiques et une étude géotechnique détaillée qui devrait permettre de déterminer tous les paramètres qui sont en mesure d'amplifier souvent les secousses sismiques [2].

1.7 Comportement des structures à l'action sismique

Il ne sera susceptible à la structure de résister aux séismes que si elle est correctement construite. La grande question pour laquelle on n'avait pas de réponse claire ; « quand nos bâtiments doivent résister aux séismes ? »

Les déplacements des fondations ne créent de sollicitations qu'en fonction de la réponse de l'ouvrage aux déformations qu'il va subir à cause de son inertie, c'est-à-dire en fonction de ses masses, de sa rigidité et de son amortissement.

Les forces d'inertie qui apparaissent pendant l'action sismique dans un élément donné résultent des actions transmises par les liaisons de cet élément avec le reste de la structure. Les déformations qui leur correspondent peuvent par contre atteindre un niveau inacceptable,

qui entraîne une ruine inévitable par instabilité plastique (instabilité de forme) qui se produit pendant les oscillations de la structure.

Ces oscillations correspondent aux passages d'ondes sismiques, elles sont entraînées par des déplacements de sol d'assise auquel les constructions sont mécaniquement couplées par leurs fondations. D'où l'idée de procéder à des systèmes d'appuis parasismiques comme un filtre de manière à pouvoir dissiper le maximum ou toute l'énergie due à l'action sismique.

1.8 Bref aperçu du développement des systèmes d'amortissements

La déformée de la structure soumise à l'action sismique dépend en particulier des propriétés d'amortissement des matériaux constitutifs de la structure, des assemblages des différents éléments de la structure et des liaisons avec le milieu environnant donc interaction sol-structure.

Les phénomènes physiques intervenant dans l'amortissement d'une structure ou du sol sont nombreux ; frottement, viscosité et plasticité des matériaux.

Du point de vue pratique, l'amortissement d'une structure se décompose comme suit :

- de l'amortissement interne ou structural ; il se produit dans les matériaux à condition qu'il subisse et présente la principale cause de dissipation d'énergie [3] qui se décompose en deux termes :

- 1- L'amortissement visqueux lié à des matériaux et dépendant des fréquences ; il caractérise la capacité d'absorption d'énergie dans le domaine élastique et qui se compose :

- d'amortisseurs visqueux linéaires ;
- d'amortisseurs visqueux non linéaires ;
- d'amortisseurs viscoélastique.

- 2- L'amortissement hystérésis, indépendant de la fréquence et ayant son origine dans le domaine de non linéarité du comportement des éléments structuraux. Il est dû aussi de la loi force-déplacement [4] exemple appui de frottement en téflon ou appui élastomère avec noyau en plomb plastifié. Des études expérimentales ont montré que les systèmes à un degré de liberté ou simulé, le paramètre important est la force limite élastique (ou force de glissement) et non pas la limite élastique qui se compose de :

- amortisseurs métalliques ;
- amortisseurs à frottement.

L'augmentation de l'amortissement visqueux au-delà de sa valeur optimale qui est de l'ordre de 35% peut avoir des effets indésirables et au-delà de cette valeur, les valeurs de

l'accélération et les efforts augmentent. Par contre l'amortissement hystérétique conduit à des accélérations plus importantes encore riches à hautes fréquences que l'amortissement visqueux ;

- les amortissements externes, correspondent à des frottements divers et se résument essentiellement à ceux qui interviennent le long des surfaces de contact entre le sol et les fondations [5], (appelé aussi amortissement à amplification géométrique), pris en compte dans les modèles de l'interaction sol - structure ou entre les éléments de structures.

Toute structure soumise à un chargement horizontal se déforme. Cette déformation entraîne le déplacement des éléments structuraux de leur position d'équilibre ; celle-ci induit l'apparition des forces de rappel qui s'opposent à la déformation et tendent à restaurer la structure dans sa forme originale lorsque cesse l'application de chargement. En utilisant aussi le spectre de réponse à un niveau d'amortissement celui-ci mène à la détermination de ces forces [6]. Ce comportement est déterminé par la nature des forces inter-granulaires des matériaux de la structure qui est un comportement réversible.

Par contre lorsque les amplitudes deviennent importantes, le matériau constitutif est sollicité au-delà de son domaine élastique (réversible). Le comportement du système devient non linéaire. Cette situation se rencontre tout particulièrement lors de la sollicitation d'ouvrage dans les zones siège (au niveau des fondations) des secousses sismiques qui reste et demeure toujours un problème très délicat pour les concepteurs, car ils doivent assurer le maintien en fonctionnement des ouvrages à la suite d'un séisme.

1.9 Systèmes d'isolations sismique

Le concept d'énergie est un phénomène fondamental à considérer. La base d'isolation fournit des résultats fiables pour un grand nombre d'applications, même pour les bâtiments historiques, les bâtiments stratégiques et les bâtiments publics, etc. [7].

L'objectif de la stabilité structurelle à l'avenir est d'utiliser des systèmes isolateurs, qui constituent la technologie la plus efficace pour protéger les systèmes structurels ainsi que leurs équipements intérieurs d'une part, et pour contrôler le comportement de la structure sous une charge sismique [8-9] d'une autre part. Une évaluation historique des systèmes d'isolation sismique est incluse dans la littérature [10-12].

Le premier brevet de système d'isolation sismique obtenu en 1909 [12] et depuis, de nombreuses recherches sur ce sujet ont été faites [13-19].

Plusieurs dispositifs d'isolation de base ont été conçus, testés et installés sur des bâtiments et des ponts étudiés par élément finis software Seismo-struct [20]. Partout dans le monde. Parmi ceux-ci, les plus populaires sont les isolateurs en élastomère. D'autres concepts ont été développés tels que le dispositif de palier en caoutchouc à amortissement élevé, le dispositif de palier en caoutchouc au plomb, le dispositif de palier en caoutchouc à amortissement élevé, le dispositif de palier à friction, etc[21-25].

Le détail analytique d'un système d'isolation de base se trouve à Alam et al [25]. Les dispositifs d'isolation les plus couramment utilisés sont les roulements à base de caoutchouc naturel (NRB) ou à plaque composite renforcée de fibres [26]. Ceux-ci utilisent différentes sortes de fibres telles que le carbone, le verre, le polyester et le nylon en les testant expérimentalement afin de déterminer et de comparer les différentes propriétés mécaniques entre elles.

Enfin, les résultats peuvent confirmer que les propriétés mécaniques du système d'isolation en élastomère renforcé de fibres de carbone sont les plus performantes en raison de son module d'élasticité et de sa grande résistance à la traction par rapport aux autres, notamment le système d'isolation en élastomère renforcé en acier, lourd et coûteux [27-28]

L'autre concept d'isolation d'un modèle structurel simplifié à trois corps en masse pour les étages isolés est utilisé pour effectuer l'analyse linéaire équivalente [29] et peut répondre aux fonctionnalités requises pour le bâtiment.

La méthode des éléments finis est utilisée à cet égard pour étudier la modélisation, le maillage et l'analyse du NRB. Le comportement de ce modèle est effectué à l'aide du logiciel d'éléments finis ANSYS [30].

Le nouveau modèle présenté dans cette étude consiste, le système de structure doit être découplé des fondations de toute force latérale émanante du mouvement de sol frappante l'infrastructure.

En ce qui concerne l'architecture, le modèle peut satisfaire toutes les exigences de conception architecturale. Pour ce qui est de la conception réelle du génie civil, la rotation due à l'excentricité de chaque niveau des bâtiments est inévitable.

Cependant, en utilisant ce modèle, on peut ne pas supposer que la structure accuse un mouvement, concevoir des murs de contreventement tout autour de la structure au niveau des isolateurs à la base et prévoir des amortisseurs comme dispositifs supplémentaires, l'ensemble peut être considérée comme des absorbeurs d'énergie.

En plus de ce système d'isolation à la base il y a le système de contreventement à friction placé sur des structures en charpentes métalliques, proposé par des chercheurs Canadiens (Pall

et Marsh, 1982) [31] Filiatrault et Cherry en 1988. Il ont fait la comparaison de la performance sismique d'un seul type de structure métallique ordinaire d'une part et d'une autre part la même structure équipée par le système d'isolation à la base et le système de contreventement ordinaire avec une autre ossature de même type non isolée à sa base mais seulement équipée par un système contreventé à friction.

Ce n'est qu'à partir de 1885-1886 que le Japon et les Etats-Unis se sont lancés dans ce créneau. L'application de cette technologie de l'isolation sismique aux ouvrages stratégiques et publics a fait l'objet de recherches approfondies, notamment au Japon[32-33].

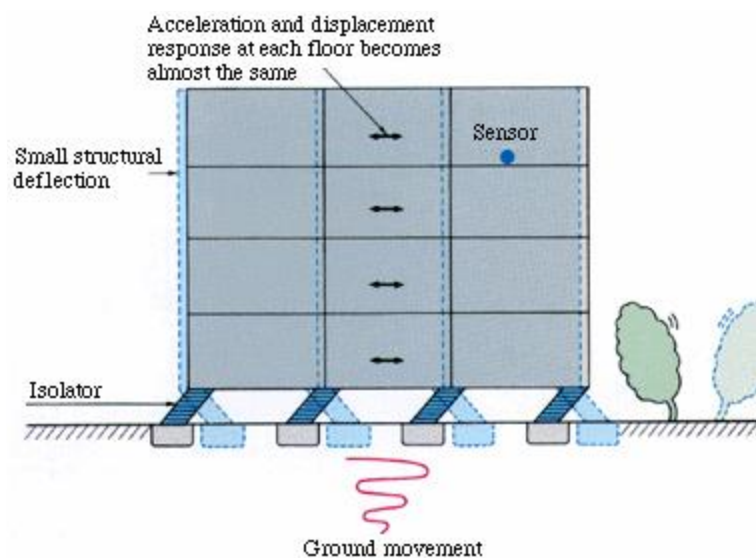


Figure 1.1: Base Isolation System (Takenaka Corporation 2001)

En Taiwan aussi au moins trente bâtiments construits en utilisant le système d'isolateur sismique avant 2009(Chang et al. 2007 ; Kamada et Fujita, 2007 ; Zhou et al, 2007).[34-35]. Récemment le système d'isolation a été conçu typiquement au niveau haut du premier plancher, ce qui a attiré une grande attention du fait que ce concept va pratiquement arranger tous les architectes et qui va leur permettre d'innover sans le moindre gêne mais à condition que le bâtiment présente une symétrie parfaite et une forme régulière, En tant que solution de renforcement, son utilisation s'applique aux bâtiments et aux ponts ayant un intérêt historique et bénéfique à la population.

Ce léger déplacement de la figure 1.1 peut porter un grand préjudice caractérisant la sensibilité à la torsion de la structure. Si cette dernière présente des irrégularités en plan ou en élévation, le bras de levier entre le centre de masse et le centre de torsion s'impose et le système d'isolation ne peut résoudre le problème de l'oscillation de la structure. C'est l'une

des motivations de notre recherche sur le modèle pour qu'il s'adapte à tout genre de structure sans pour autant transmettre le moindre des déplacements à toutes structures confondues.

1.10 Isolation parasismique

1.10.1 Principe

Le système d'isolation à la base peut se trouver dans différentes localisation comme indiqué sur la figure 1.2 . Il consiste en l'installation d'isolateur sous chaque élément porteur de la structure, plus précisément entre les fondations et la superstructure ou entre le sous-sol et le rez-de-chaussée ou encore (Chopra, 2001) [36] entre planchers [37] qu'on veut isoler. L'isolation dans les bâtiments s'effectue au moyen d'appareils d'appuis, ces appareils, appelés appuis parasismiques ou isolateurs,

Ces isolateurs beaucoup moins rigides que la structure, constituent une coupure et un véritable découplage entre le mouvement du sol et le mouvement de la structure. Le domaine de recherche en parasismique a connu des percés dans le développement de calcul moyennant l'outil l'informatique beaucoup plus puissant et le simulateur sismique tel que la table vibrante permettant la mise à l'essai des systèmes d'isolation à la base. L'intérêt de cette technologie est la sécurité et le confort des occupants des bâtiments et qui se justifie par l'aspect économique.

1.10.2 Comportement des isolateurs

Le système d'isolation à la base de point de vue énergétique limite le transfert de l'énergie sismique à la structure ; en d'autres termes le fait qu'ils sont placés sous chaque point porteur, au droit des intersections des éléments de la structure : ils agissent donc comme un filtre qui ne laisse pas passer les vibrations de longues périodes et de manière à pouvoir dissiper le maximum d'énergie sismique avant qu'elle n'atteigne la structure ; se déplaçant essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et quasiment pas de déformations.

Ainsi, les forces d'inerties transmises à la structure sont limitées et restent en dessous de la capacité élastique de cette dernière. Les dommages subis par cette superstructure et par les éléments de fondation sont alors réduits. Enfin la fonctionnalité architecturale et la conception génie-civil des structures sont conjointement préservées.

A cet effet pour en conclure, il n'est donc théoriquement pas nécessaire de concevoir des éléments de contreventements ou de dimensionner la structure pour résister aux charges horizontales qui se trouvent anéanties à l'aide de la présence des isolateurs conçus en conséquence au niveau de la base de la structure.

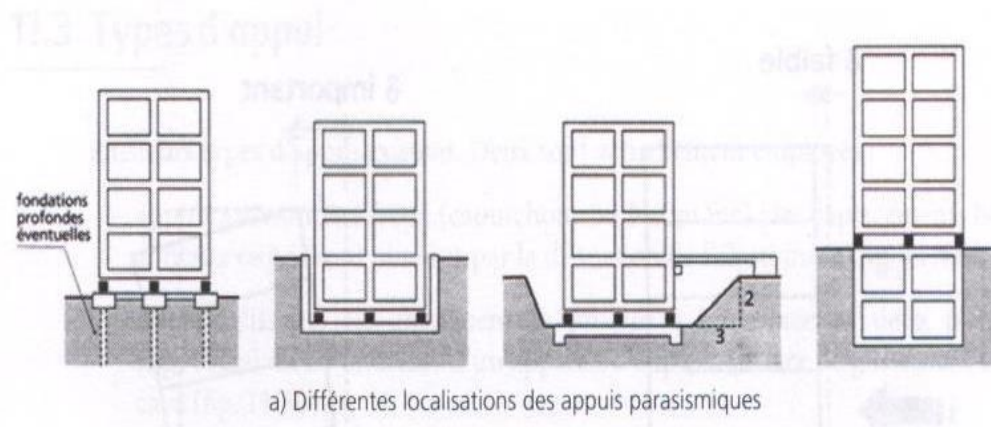


Figure 1.2: Base Isolation System sur différentes localisation

Malgré l'existence de plusieurs systèmes différents le principe d'isolation à la base reste le même. Le système d'isolation à la base combine deux composantes principales :

- un isolateur, tel que des rouleaux à billes ou des blocs de caoutchouc entre les fondations et structure (Kelly, 1979). Cet isolateur, qui possède une rigidité beaucoup plus faible que celle de structure, déplace la fréquence naturelle de la structure en dessous de la plage de fréquence des seismes ;

- un mécanisme de dissipation d'énergie (amortisseur) qui dissipe l'énergie sismique résiduelle et limite les forces transmises à la structure.

Les déplacements imposés à la structure par les secousses du sol se localisent principalement au niveau des appuis, conçu et envisagés pour supporter sans dommages et cela grâce à leur faible rigidité horizontale.

Pour jouer correctement leur rôle, les appuis doivent permettre des déplacements horizontaux importants et présenter en même temps une grande rigidité verticale. Compte tenu de cette dernière, les accélérations verticales transmises ne sont pas filtrées mais elles sont sensiblement égales à celles du sol.

Il importe que la superstructure soit suffisamment rigide pour que son faible déplacement par rapport aux appuis soit comme une masse quasi indéformable figure 1.3.

Il importe aussi qu'une grande importance doit être donnée aux constructions dont les fondations sont à des niveaux d'ancrages différents. Par ailleurs, le sol d'assise doit être suffisamment ferme afin que les appuis ne subissent pas de tassements différentiels.



Figure 1.3: Isolateur System en plein mouvement latéral

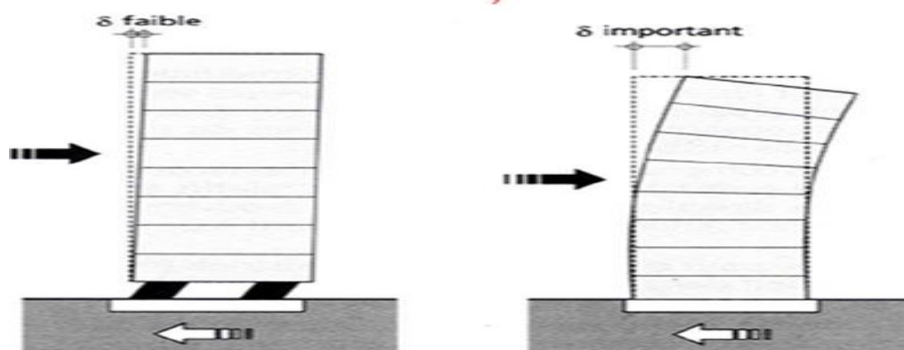


Figure 1.4: Oscillation de la structure avec isolateurs oscillation de la structure sans isolateurs

L'efficacité des appuis est lorsque la rigidité verticale de l'isolateur doit être beaucoup plus grande que sa rigidité horizontale, qui est de l'ordre de 300 à 400 fois selon des études théoriques et expérimentales (Lee, Medlan et Mellet 1978, Blakeley, 1980, Eisenberg et Rutenberg, 1986), ce qui va permettre à l'oscillateur d'être considéré comme parfaitement rigide dans la direction verticale. C'est cette grande différence qui rend les accélérations

faibles communiquées à la construction. Le cas contraire est à craindre quand la rigidité verticale présentant un défaut au niveau des appuis.



Figure 1.5: Un des ouvrages stratégique à préserver par insertion de système d'isolation, Oakland City Hall.

C'est à dire ces oscillations qui correspondent au passage d'ondes sismiques, sont entraînées par des déplacements du sol d'assise auquel les constructions sont mécaniquement couplées par leurs fondations. Par contre le seul inconvénient à craindre dans ce cas de figure est lorsque la structure est très souple.

Les planchers immédiatement au-dessus des isolateurs doivent impérativement constituer un diaphragme rigide à un seul degré de liberté latéral afin d'assurer une bonne et correcte répartition des charges entre les appuis.

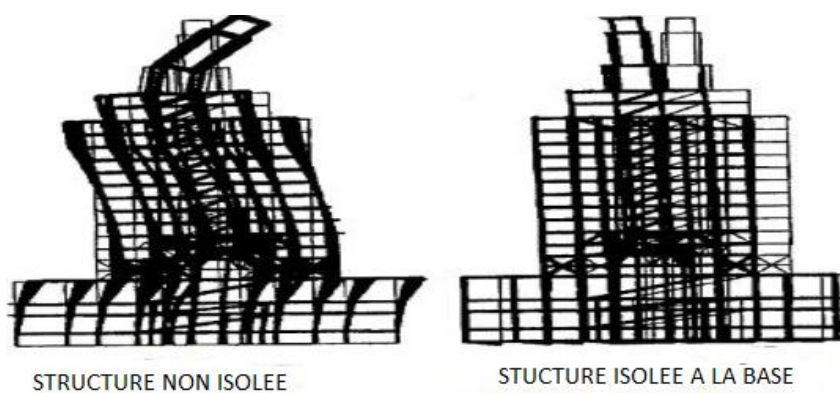


Figure 1.6: Ouvrages stratégique modélisé avec et sans isolateur

L'isolateur repose sur le principe que si la durée de vibration a suffisamment augmenté pour s'éloigner de la durée d'excitation maximale du tremblement de terre, les accélérations reçues par la structure (par conséquent les forces d'inerties) sont nettement réduites. En revanche l'augmentation de la durée engendre des mouvements plus importants qui se concentrent au niveau du système d'isolation.

1.11 Conclusion

Dans ce contexte de nouveaux concepts de protection structurale ont été améliorés et sont dans les dernières années, d'actualités importantes. Ils permettent de protéger des structures par des systèmes possédant des propriétés d'amortissement, couplés à la structure ; de telle façon qu'elles soient en mesure de réduire au maximum les déplacements des structures lorsqu'elles sont soumises au séisme.

Le concepteur praticien doit envisager le système d'isolation sismique comme alternative à la conception conventionnelle à base fixe.

La plupart des systèmes sont destinés à dissiper de l'énergie sismique introduite dans la structure par des mécanismes supplémentaires d'amortissement.

Le principal objectif est de se familiariser avec les différents systèmes innovants qui ont démontré un potentiel considérable à travers les études analytiques et les mises en œuvres expérimentales.

Celui-ci portera sur les systèmes passifs de dissipation de l'énergie et sur les systèmes d'isolation sismique.

Dans ce cas, l'intégration des unités d'isolation, et l'usage d'un dissipatif parallèle et externe au dispositif de dissipation d'énergie (amortisseur) ainsi que le système de contreventement sont requises pour contrôler, limiter les mouvements et réaliser une conciliation efficace entre la réduction de la force et l'accroissement du déplacement.

En général, les systèmes d'isolation sismique permettent non seulement de réaliser des économies sur le coût de la réalisation de la construction et de présenter un avantage indéniable à long terme car la construction préserve sa fonctionnalité après chaque séisme.

Actuellement la non disponibilité des normes et des règles Algériennes de calcul sont les principaux obstacles à cette jeune et innovante technologie.

CHAPITRE 2

CLASSIFICATION DES DIFFERENTS TYPES D'ISOLATEUR

2.1 Introduction

Plusieurs systèmes d'appuis existent actuellement. Les appuis parasismiques ont un grand intérêt pour la plupart des pays concernés par le risque sismique. L'installation de ces appuis n'était pas évidente car ils ne sont mis en place qu'après de nombreuses études, au niveau des terrains et des bâtiments, pour savoir s'ils conviennent.

En effet, il est nécessaire de voir si ces appuis vieilliront bien, et ne devront pas être remplacés avant la durée de vie du bâtiment car cette accélération de vieillissement pouvant être dû à la température, à l'humidité ou aux agents chimiques. De plus, ces appuis doivent être capables de résister à des séismes d'intensité plus forte que celle prévue lors de la conception parasismique du bâtiment.

2.2 Types d'appuis parasismiques

2.2.1 Systèmes d'isolation sismique passifs

Il existe plusieurs systèmes d'isolation sismique différents, pourtant ils sont tous constitués à partir d'une ou plusieurs catégories principales suivantes :

- isolation par appuis élastomères ou à déformation ;
- isolation à glissement ou à frottement pur ;
- appui balancé à fréquence variable et appuis à roulements ;
- appuis à déformation et glissement ;
- isolation par alliages à mémoire de forme ;
- isolation par boîtes à ressorts.

Avant utilisation, tout système d'appuis parasismiques doit faire l'objet d'une procédure de validation technique, destinée à déterminer ses caractéristiques de calcul ainsi que de prouver sa fiabilité et sa durabilité[38]. On doit également effectuer un contrôle de conformité avant mise en place. Il en existe d'autres types d'appuis qui sont au stade d'études théoriques ou d'essais aux laboratoires.

Tout type d'appui doit être installé au droit et sous chaque point porteur de la structure pour assurer un découpage net entre le sol et la structure, quel que soit le type d'isolation à adopter le principe du système d'isolation restera le même. Le concept de calcul des appuis est selon les conditions et les critères les plus strictes que le reste de la structure [39] recommande un dimensionnement qui prévoit de supporter une période de retour de séisme.

2.3 Appuis élastomères simples LDRB« Low Damping Rubber Bearings »

Selon le mode de fonctionnement les isolateurs sont classés en plusieurs types.

2.3.1 Appui à déformation

Ce sont des appuis en caoutchouc à haute dissipation d'énergie. Ce sont des systèmes à base d'élastomère, ces systèmes exploitent le principe de l'appui fretté et sa flexibilité latérale. Il est à base d'appui fretté comme indiqués sur les figures 2.1 et 2.2.

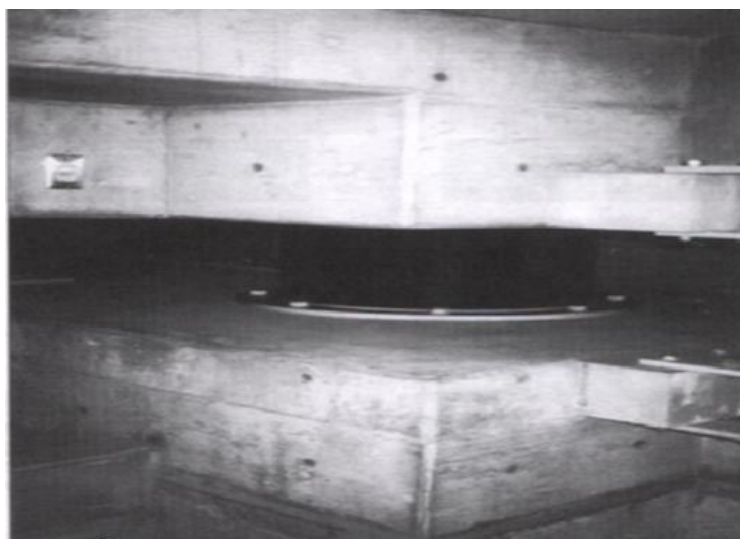


Figure 2.1 : Isolateur en élastomère (caoutchouc frette) posé sur un socle de fondation

Ce système est constitué d'un ensemble de couches d'élastomères naturel (caoutchouc) ou synthétique en néoprène alternées par des plaques ou tôles d'aciers doux appelées frettes, ces dernières sont en mesure d'assurer la rigidité verticale des appuis.

Cette rigidité est assurée d'avantage si l'épaisseur de l'élastomère est réduite avec une augmentation du nombre de frettes et cela si on veut minimiser la flexibilité horizontale des appuis.

Ceci est fonction de type de la structure, c'est-à-dire plus la construction est légère ou souple plus les forces horizontales doivent être réduites, ce qui entraîne une grande flexibilité horizontale des appuis, diminution de leur stabilité et qui nécessite de fortes épaisseurs d'élastomère tout en assurant efficacement l'isolement de la structure.

Des déplacements du mouvement du sol et des soulèvements de la superstructure en cas de dépassement du séisme de calcul, testé au centre de recherche en génie-parasismique de Californie [40].

L'amortissement que procure l'élastomère ne peut dépasser les 12% (selon la formule développée de sa composition chimique) de l'amortissement critique.

Les élastomères sont très susceptibles aux différences conditions climatiques (exemple différence de températures) par conséquent les mesures de protection contre l'incendie, la corrosion et des poussières doivent être prise en considération au préalable.

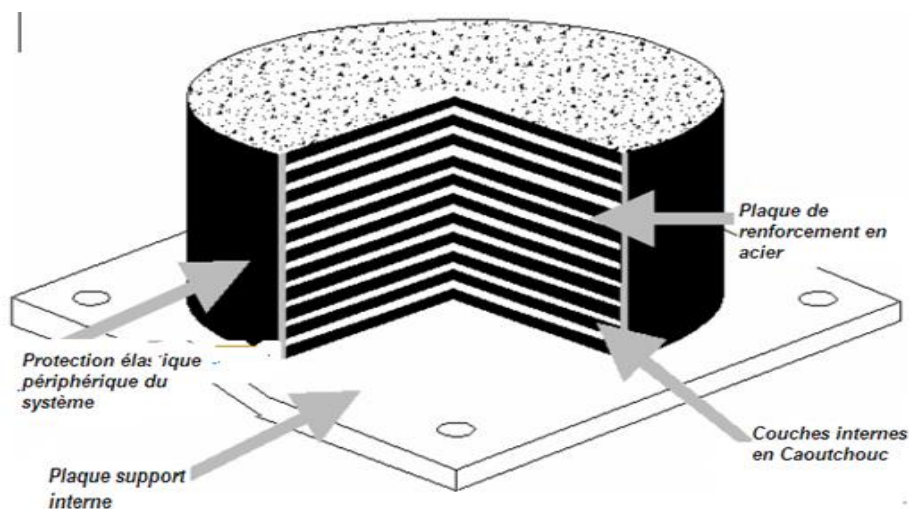


Figure 2.2 : Système d'appui sans plomb

Le plus simple des systèmes des appuis parasismiques est l'appui en élastomère fretté figure 2.2 exactement comme ceux utilisés dans les ponts. Ces appuis sont de forme carrés ou circulaires dont les dimensions en plan sont selon le calcul de l'ouvrage comme indiqués sur les différentes figures.

Ces élastomères sont constitués par un empilement de feuilles de caoutchouc allant de 5 cm à 30 cm d'épaisseur séparés par des plaques (tôles) métalliques lisses appelés frettes qui sont en

mesure d'assurer ou de conférer aux appuis une rigidités qui peut résister à la charge verticale due à la structure. Pour ce qui est des élastomères, ces derniers peuvent se déformer ou subir des déplacements horizontaux avec une grande souplesse selon le déplacement induit par le séisme entre la structure et le sol.

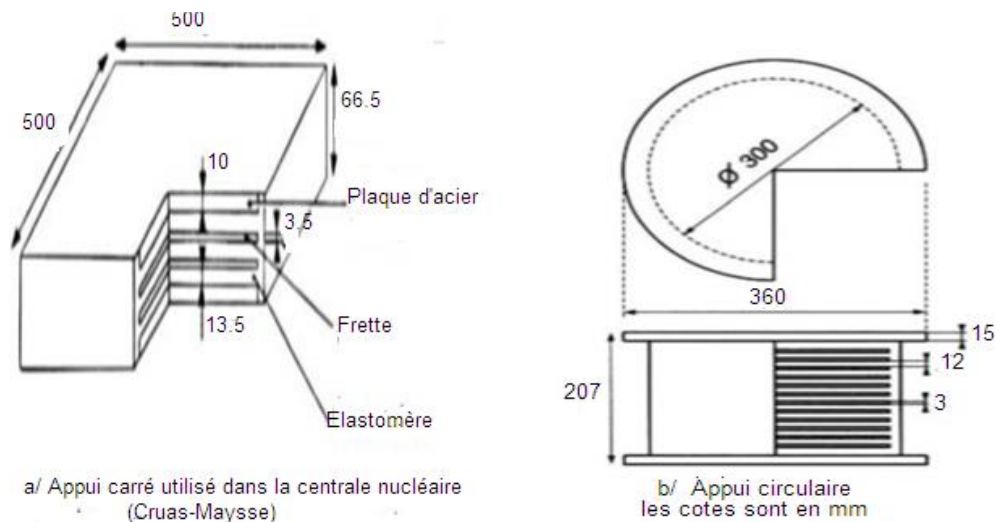


Figure 2.3 : Appuis parasismiques en élastomères fretté

Comme l'élastomère se déforme en cisaillement selon une surface en plan et une hauteur relative à l'élastomère comme illustré dans la figure 2.3, la rigidité de ce dernier est le produit de sa nuance en cisaillement par la surface d'impact et inversement proportionnel à sa hauteur qui est $G.S/h$.

Il faut que les essais de cisaillement au laboratoire sur l'élastomère ne doit pas excéder une certaine résistance qui va être étroitement liée à la fourchette de l'intervalle de période du premier mode de vibration que l'on désire affecter à la structure, cela afin de pouvoir déterminer le facteur déterminant qui est la hauteur h de l'élastomère, dont la formule de la période est :

$$T=2\pi (m/k)^{1/2} \text{ ou } k = G.S / h \text{ avec } m : \text{ la masse du bâtiment}$$

$$T=2\pi (m.h / G.S)^{1/2} \text{ correspond à une structure rigide posée sur des appuis parasismique.}$$

Les inconvénients des appuis élastomères sont :

- la raideur et le coefficient d'amortissement sont sensibles à de larges variations de température. Les caractéristiques du matériau élastomère évoluent aussi avec le temps [41] ;
- le déplacement de la structure par séisme majeur peut conduire à des phénomènes d'instabilité au niveau des appuis si le déplacement n'a pas bien été conçu au préalable lors du dimensionnement.

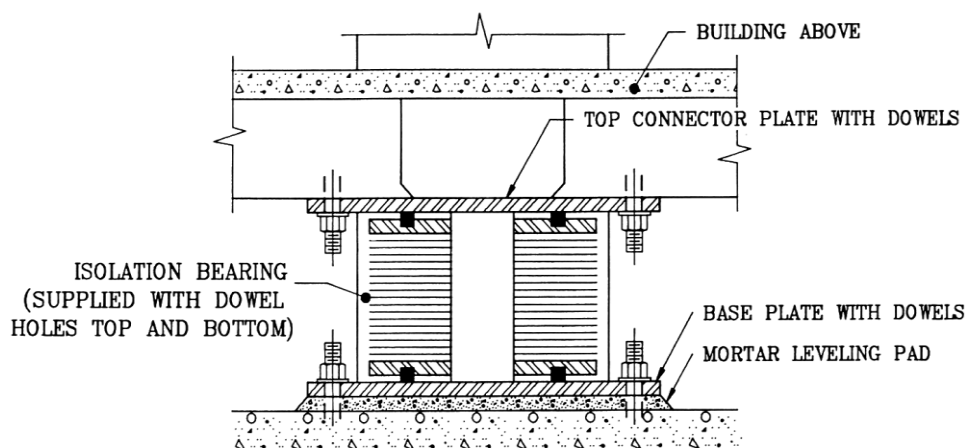


Figure 2.4 : Isolateur boulonné au socle de la fondation

Généralement la section S en plan de l'élastomère sera déterminée au préalable sous charges verticales permanentes additionnées aux surcharges d'exploitations, l'ensemble centrées aux niveaux des appuis c'est-à-dire au droit de l'emplacement de ces appuis figure 2.4.

2.3.2.Exemple de confortement d'appuis parasismiques d'un cylindre à gaz liquide

Etat initial, un réservoir cylindrique de 15m de diamètre et de 16m de hauteur figure 2.5 . Ce cylindre est destiné à stocker 1000t de gaz liquide reposant sur une dalle en béton armé, cette dernière est supportée par 16 poteaux circulaires de 50cm de diamètre et de 2.20m de hauteur fondés sur des pieux.



Réservoir de gaz liquide (1000t) à Viege

Figure 2.5 : Réservoir de gaz posé sur socle circulaire

Les raisons pour lesquelles l'insertion d'appuis parasismiques devraient avoir lieu sont, le cylindre est posé sur des poteaux que l'on peut considérés comme poteaux courts figure 2.6 et qui peuvent être sollicités en flexion et en cisaillement lors d'un séisme. C'est ce qui fait la raison du confortement [42-43].



Figure 2.6 : Réservoir de gaz posé sur isolateur inséré sur les socles



Figure 2.7 : L'isolateur du réservoir de gaz liquide vue de près

Selon un calcul fait, la fréquence fondamentale a été réduite de 2Hz à 0.5Hz presque au deux tiers. Cette insertion comme l'indiquent les figures 2.7, 2.8 et 2.9, va permettre de diminuer les efforts exercés à la base du cylindre en cas de chargement horizontal. Cette procédure d'insertion pourra s'adapter à toutes autres de structures (exemple les ponts) comme le montre la figure ci-dessous.



Figure 2.8 : Isolateurs utilisés au niveau des poteaux élancés des ponts



Figure 2.9 : Confortement par Insertion des isolateurs à haut pouvoir amortisseurs au niveau des culées d'un pont

2.3.3 Appui élastomères fretté avec plots en plomb. (HDBR High Damping Rubber Bearings)

Ce sont des appuis en caoutchouc avec plots en plombs itué au noyau du système (L.R.B Lead Plug Rubber Bearing). C'est le même système seulement le noyau de plomb est intégré au centre de l'appui (Robinson, 1982) qui peut assurer un taux d'amortissement élevé par hystérésis interne. Le pourtour du système est complètement revêtu d'élastomère.

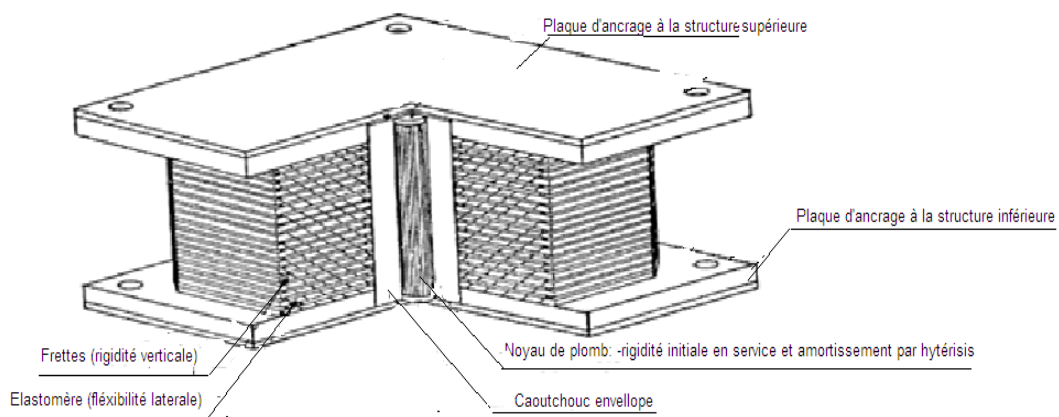


Figure 2.10 : Isolateur à base d'élastomère avec noyau de plomb

Ces appuis (LDRB) auxquels le plot central ou plusieurs plots répartis sont ajoutés. Les déformations plastiques de ces plots (comportement plastique du plomb figure 2.10) permettent une dissipation d'énergie lors d'un séisme important. Pour une faible sollicitation, ces appuis LRB sont plus rigides que les LDRB puisqu'on reste alors dans le domaine. Ce système exploite le principe de l'appui fretté et sa flexibilité interne.

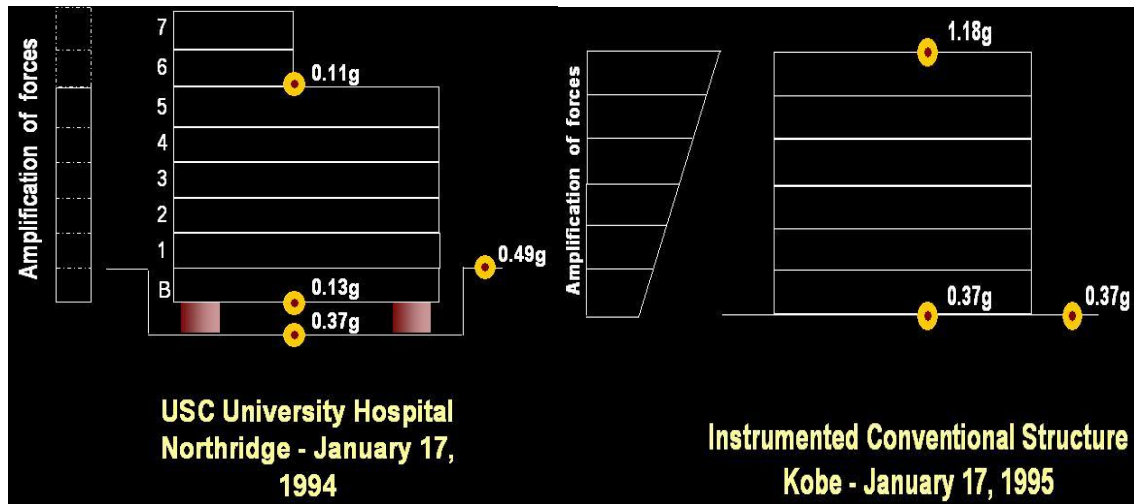


Figure 2.11 : Déplacement constant dû à un résidu de force d'inertie transmise par l'Isolateur et une oscillation d'une structure fixée

Dans la figure 2.12 ci-dessous, les appuis sont composés d'éléments combinés par de la toles en acier « téflon » dont le but est de résister à la charge verticale avec des couches d'élastomères fretté avec un noyau cylindrique en plomb et pour que l'ensemble peut et sera en mesure d'absorber les efforts sismiques et d'en dissiper de l'énergie avec un déplacement maximum à la base sans pour autant permettre à la structure de se déplacer ou au moins le strict minimum de déplacement qui peut même être négligeable.



Figure 2.12 : Déplacement constant dû à un résidu de force d'inertie transmise par l'Isolateur d'une même structure qui oscillait lorsqu'elle était fixée

Les valeurs d'amortissement associées à de tels systèmes sont plus élevées que celles des appuis HDRB.

Les avantages et inconvénients de ces appuis sont sensiblement les mêmes que ceux des HDRB.

La technologie dans le domaine d'élastomères (caoutchouc) a permis aux concepteurs de développer des appuis ayant des capacités d'amortissement beaucoup plus importantes (coefficient d'amortissement supérieur à 10%) et un module de cisaillement réduit. Ces caractéristiques permettent d'assurer à la fois la fonction d'isolation et de dissipation de l'énergie à l'appui. Elles sont obtenues par l'ajout d'additifs de type résine ou huile au matériau élastomère.

Les HDRB ont été principalement développés aux USA, au Japon et en Italie. Les expériences menées ont démontré qu'un tel système pouvait être boulonné aux structures en béton sans craindre d'endommagement significatif du matériau sans pour autant qu'un préjudice de contrainte de traction puisse apparaître [44].

Les avantages et inconvénients d'un tel système sont sensiblement les mêmes que pour des appuis simples.

L'amortissement des appuis permet une meilleure maîtrise des déplacements.

Les caractéristiques de ces appuis étant moins linéaires, la fréquence d'isolation dépend du type de chargement qui leur est appliqué.

Ces appuis étant moins courants, ils sont beaucoup plus chers.

2.3.4. Appuis à déformation et glissement

2.3.4.1. Appui à glissement ou à frottement pur

Ce système a le même principe que celui du précédent système à appui de déformation, il permet de minimiser au maximum les forces d'inerties qui devraient être transmises à la structure due aux charges horizontales (seisme), seulement les techniques diffèrent de sensibilités.

Il s'agit de deux systèmes le premier à blocs à interfaces qui constituent un plan de glissement figure 2.13 (pression de contact) l'un par rapport à l'autre [45-46]. Le deuxième à interface comme partie supérieure fixée à la superstructure présentant une certaine concavité dont le bord relevé (forme d'anneau périphérique) de cette surface qui, représente les plots de retenues empêchant l'effet de butée du plot (figure ci-dessous) de glissement et cela afin d'éviter surtout les déplacements que l'on ne peut pas prévoir.

Ce plot de glissement est concentré au milieu de l'interface plane de la plaque inférieure solidaire aux fondations de la structure. Ce système constitue une rotule qui se déplace sur une surface concave en acier chromé, qui donne une ressemblance à un pendule inversé glissant.

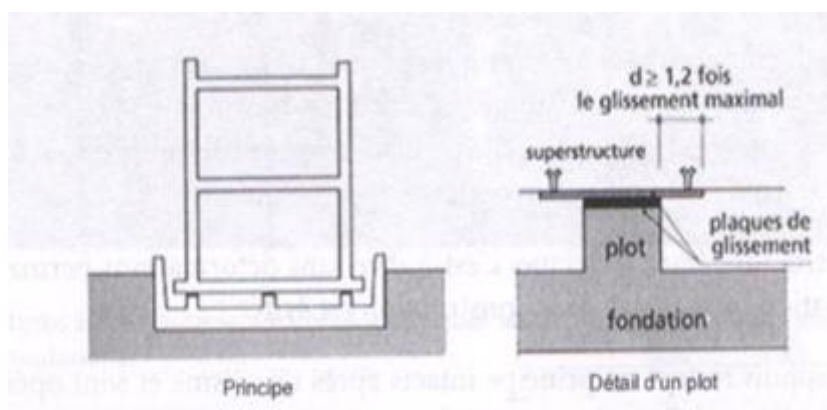


Figure 2.13 : Plaques de glissement supérieures doivent être plus grande que celles de plaques inférieures

La distance du plot de glissement au plot de retenue doit être au moins égale au déplacement absolu du sol de fondation [47], lorsque les séismes sont lointains et afin de parer à une certaine forme de poissonnement ou d'empreintes du plot de glissement sur l'interface supérieure. Ce système permet le découplage des mouvements de la superstructure de ceux des éléments de fondations au moyen d'interface de glissement figure 2.14. Ce dernier permet la dissipation de l'énergie sismique et confère au système un rayon de courbure au niveau de la concavité qui enfin peut contrôler la période du mouvement d'isolation et la quantité d'énergie dissipée du système.

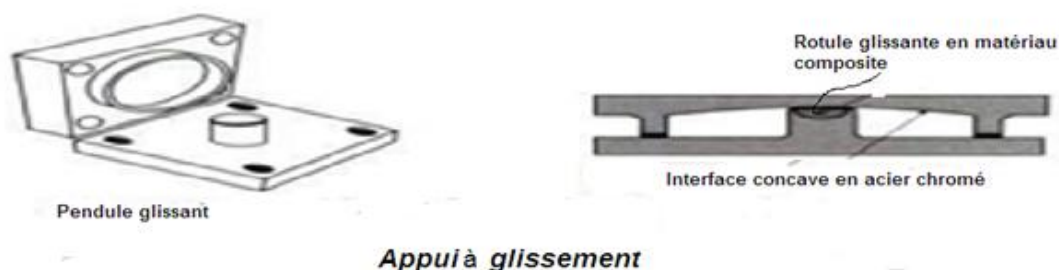


Figure 2.14 : Détails de l'isolateur à glissement

Il faut que l'interface inférieure soit la plus dure (point de vue caractéristiques mécanique du matériau utilisé) et les plots de retenues doivent coulisser sans aucun gene sur une surface plane avec un frottement constant, uniforme et même faible le long du déplacement et qu'il soit dépourvu de corrosion ou de toutes autre malformation de la plaque.

La réponse de la structure dépend de sa masse et du coefficient de frottement entre les plaques. Le déplacement relatifs maximal des plaques lors d'un séisme est limité [48] N.Mostaghel et J.Tanbakuchi ont montré sur un modèle théorique que pendant un tremblement de terre similaire à celui d'EL Centro (Californie 1940), d'intensité IX, il ne dépasserait pas de plus de 25% le déplacement du sol pour les coefficients de frottement considérés.

La concavité de la surface supérieure diminue la vitesse de glissement comme indiqué dans la figure 2.15 avant l'impact éventuel de la butée ou du choc et ne peut influencer la réponse de la structure. Les forces de frottement entre les plaques sont fonctions de la transmission des forces à la superstructure.

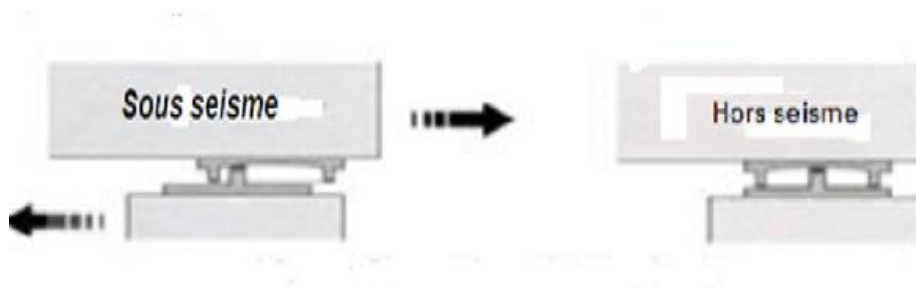


Figure 2.15 : Principe de fonctionnement de l'isolateur à glissement sous chargement horizontal

Ce système d'isolateur glissant se comporte comme dissipateur d'énergie. Une étude expérimentale sur table vibrante [49] a montré que, grâce à ces appuis, les bâtiments situés à proximité de la faille sismogène peuvent supporter sans dommage un séisme de magnitude 8, alors que sans appuis parasismiques, ces bâtiments seront fortement endommagés ou même détruits.

Des bâtiments avec appuis sont soumis à des accélérations 40 fois supérieures à celles retenues par les règles parasismiques n'ont subi que de dommages très légers.

Ce système se comporte aussi comme un dissipateur d'énergie, par le fait de la formation de rotules plastiques qui limitent le déplacement relatif maximal ce qui ne permet pas à la structure de se déplacer indéfiniment dans un sens ou dans l'autre.

Pour que la superstructure soit indépendante ou insensible au contenu fréquentiel sismique (c'est à dire de la somme des fréquences dont les ordonnées spectrales comme l'accélération, vitesse et déplacement au sommet de la structure pour une structure non isolée), il est préférable et convenable d'implanter ce type d'appuis sur des sols durs.

Ce même type d'appui va être utilisé au niveau du sous-sol de la salle de prière (145x145 m² de surface) du projet de la grande Mosquée d'Alger figure 2.16.



Figure 2.16 : Modèle d'appui à glissement utilisé dans le projet de la grande Mosquée d'Alger

C'est au niveau du sous sol de la salle de prière que sont posés les isolateurs sur des plots (ou socles), en béton armé ; vient après une autre forme de socle aussi en béton armé juste au-dessus et au droit de chaque poteau lié au plancher de la salle de prière ou peut être fixée la partie supérieure de l'isolateur (au niveau haut du plancher du sous-sol) comme indiqué sur les figures 2.16, 217 et 2.18.



Figure 2.17 : Socle en béton posé sur radier conçus et réalisés spécialement pour les appuis à glissement (grande Mosquée d'Alger)



Figure 2.18 : Appui à glissement posé sur un socle (niveau vide sanitaire)

2.3.4.2 Appuis à déformation et glissement

C'est l'assemblage entre les plaques de glissement et les appuis de déformation (déformation due au cisaillement) figure 2.19. La hauteur de l'appui est fonction directe du premier déplacement horizontal de la structure, en d'autre terme le mode fondamental.

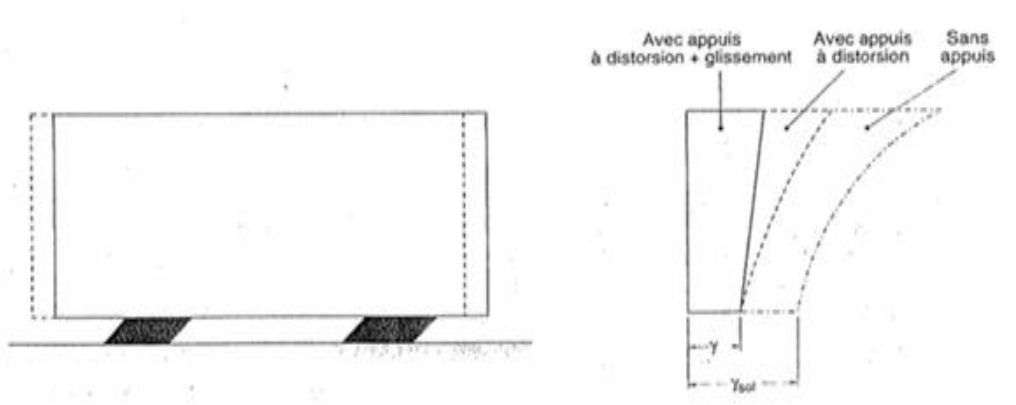


Figure 2.19 : Plaques de friction (PF – « Pure Friction sliding joint »)

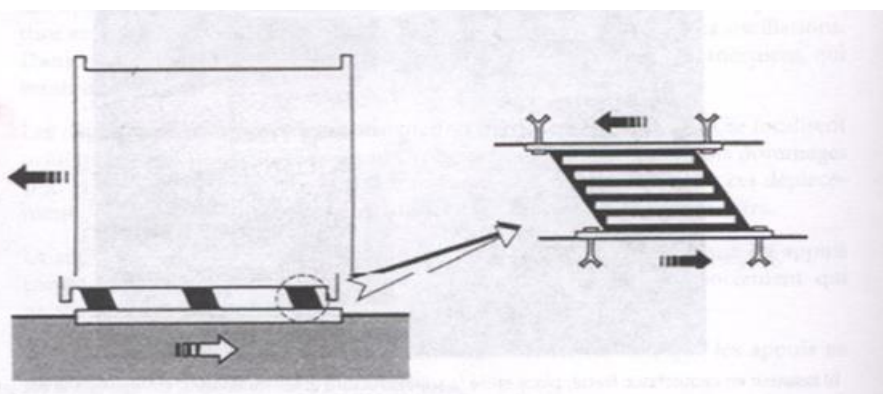


Figure 2.20 : Appui à élastomère fretté en caoutchouc ou néoprène. Déplacement horizontal entre la structure et les fondations par distortion

On admet généralement, ce type d'appuis pour les ouvrages stratégiques (centrales nucléaires, casernes, ponts, châteaux d'eau, hopiteaux etc..) d'utiliser des appuis avec une distortion, surtout dans les pays répertoriés pour des séismes de forte magnitude (minimum 7.5 à l'échelle de Richter) exemple le Japon la Californie ce qui contraint le concepteur de prévoir conformément au premier déplacement le nombre de feuilles d'élastomère qui

engendre la hauteur de l'appui, ce qui va permettre une baisse significative des efforts tranchants aux niveau des appuis.

De la même manière si la magnitude est inférieure, les appuis seront par conséquent moins.

La figure 2.21 ci-dessous indique que les appuis sont composés d'éléments combinés par de la toles en acier « téflon » dont le but est de résister à la charge verticale par des couches d'élastomères fretté avec un noyau cylindrique en plomb et pour que l'ensemble peut et sera en mesure d'absorber les efforts sismiques et d'en dissiper de l'énergie avec un déplacement maximum à la base, sans pour autant permettre à la structure de se déplacer ou au moins le strict minimum de déplacement qui peut même être négligeable.

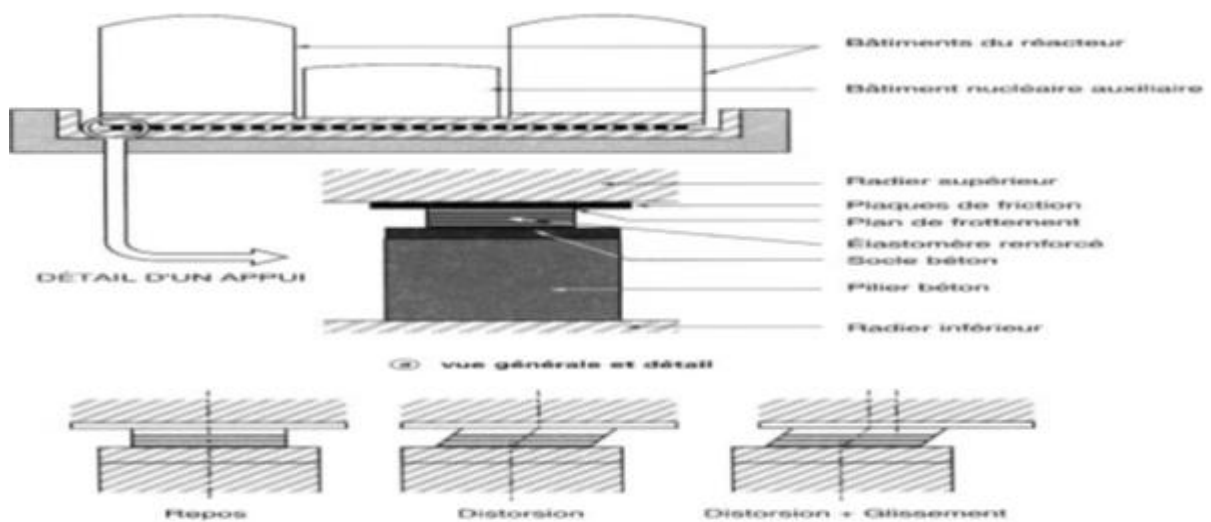


Figure 2.21 : Mode de fonctionnement des appuis glissants

Des concepteurs ont utilisé des appuis parasismiques à déformation et glissement au projet de la centrale nucléaire de Koeberg en Afrique du sud et dans certains pays dans le monde, comme illustré dans la figure ci-dessus et se sont fiés à des études qui montrent qu'ils constituent un système de protection très efficace sans qu'ils n'aient été éprouvés par des séismes.

2.3.4.3 Appuis à roulements

Deux types de systèmes à roulements sont conçus :

- système à bille ovale enclavée entre deux plaques l'une concave l'autre convexe, ce système permet un mouvement dans toutes les directions figure 2.18 ;

- système à rouleaux cylindriques superposés d'une manière orthogonales, il permet des mouvements dans les deux sens figure 2.22.

Ces systèmes sont très peu fréquents à cause de la corrosion et d'un éventuel grippage qui se manifeste après de longues périodes entre les différents chargements horizontaux.

Le matériau des appuis utilisés doit être plus dur (de point de vue caractéristique mécanique) que les billes ou les rouleaux cylindriques afin d'éviter les éventuels traces ou empreintes ou même une forme de poinçonnement ; ces derniers seront à l'origine des périodes de séismes lointains.

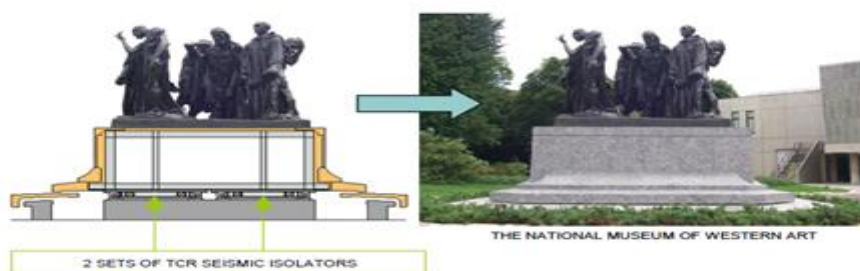


Figure 2.22 : Appui à roulement

2.3.4.4 Appui balancé à fréquence variable

Tous les types d'appuis doivent subir des essais aux laboratoires au moyen d'une table vibrante figure 2.23. afin de confirmer, toute modélisation mathématique suivi d'un calcul de découplage entre structures et appuis et les déplacements sous sollicitations de chacun d'eux.



Figure 2.23 : Portique en charpente métallique posé sur table vibrante supporté par un appui PRB

Exemples de test fait au laboratoire sur un modèle en charpente métallique posé sur des appuis parasismiques au niveau de chaque appui fixé sur une table vibrante.

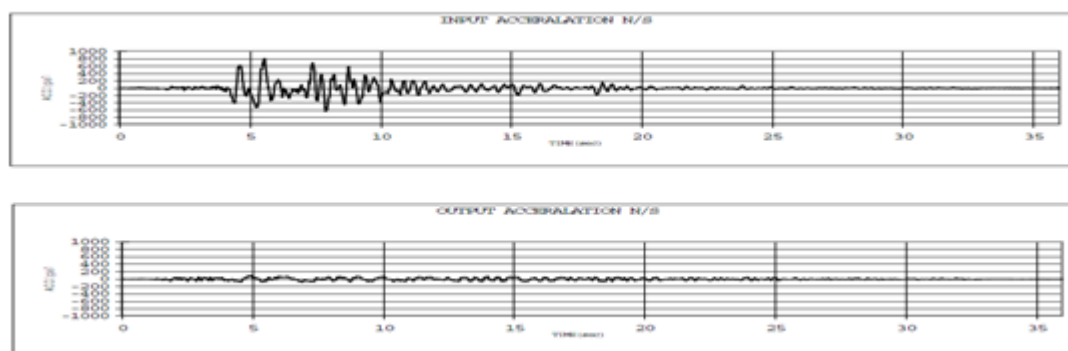


Figure 2.24 : Résultats donnés par test à la table vibrante (accélérogramme)

Ce type d'isolateur a été conçu, calculé au préalable et testé aux Etats-unis [95].

L'appui ci-dessous figure 2.25 est constitué d'une pièce circulaire pleine (massive) en acier, fixée sur la plaque d'ancrage supérieure où repose la structure d'une part et d'une autre part elle présente en son milieu une cavité (douille) d'où pénètre une tête sphérique en acier, qui joue le rôle d'une articulation. Cette tête sphérique est issue d'un socle solidaire à une pièce toujours en acier qui a une forme concave à sa partie inférieure et qui permet le balancement par glissement de va et vient autour d'un axe de symétrie.

Lu et al [50] ont étudié avec différentes courbes où la rigidité est aussi en fonction du déplacement de l'isolateur, cette pièce est posée sur une plaque d'ancrage fixée au fondation

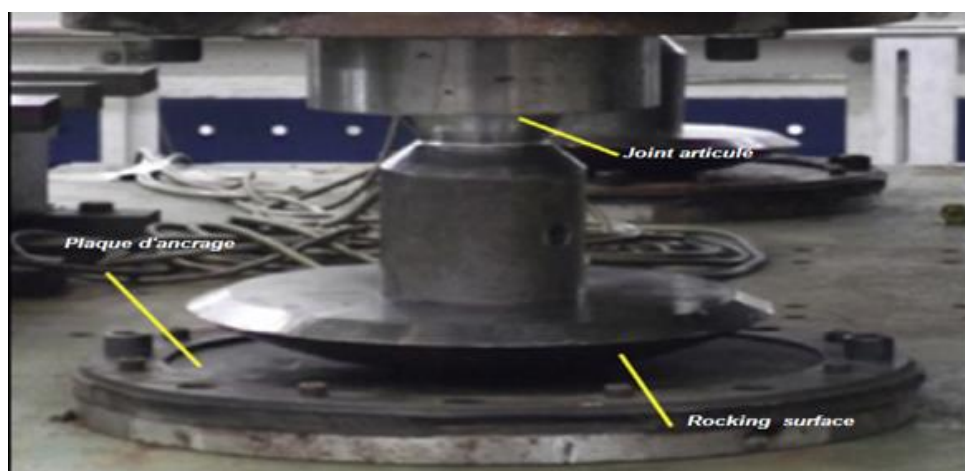


Figure 2.25 : Photo type appui PRB

La forme de la concavité ou la fonction géométrique $Y = G(x)$ de surface de balancement, le rayon r de la sphère au niveau de l'articulation et la hauteur h de l'appui sont conçus selon un répertoire sismique de la région comme le montre la figure 2.26.

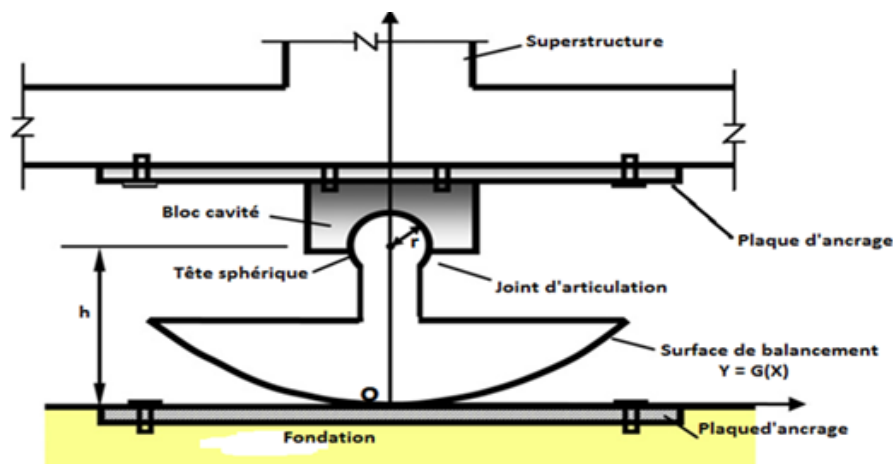


Figure 2.26 : Appui à balancement à fréquence variable posé entre superstructure et fondation

Un appui à pendule de frottement (FPS – « FrictionPendulum System ») est composé d'une surface sphérique concave en acier inoxydable sur laquelle glisse un patin articulé dont la surface est recouverte d'un métal à la base, la non linéarité crée la force qui a un coefficient de frottement déterminé par utilisation d'une approche numérique appelée shear balance method (SBM)[51].

(Polytétrafluoroéthylène) [52] ou PTFE. Le patin est relié à la structure par des plaques d'ancrage et supporte la charge verticale. Un schéma d'un appui FPS typique est présenté sur la Figure 2.5 où e désigne le déplacement maximal limité par la présence des butées.

La structure à isoler est posée sur des appuis à frottement.

Basée sur des approches numériques Yeh IL a illustré les systèmes par des simulations numériques [53-54]. Tant que l'excitation horizontale reste inférieure à la force de frottement statique, les sollicitations sismiques transmises à la structure sont identiques à celles qui auraient été transmises sans isolation.

Dans le cas contraire, il y a du glissement entre la structure et le support.

La réalisation des appuis à frottement se fait avec des matériaux à faible coefficient de frottement. Parmi les réalisations industrielles, on peut citer des plaques de PTFE (polytétrafluoroéthylène) sur des surfaces en acier inoxydable, des plaques en alliages bronze/acier ou bronze/plomb sur des surfaces en acier.

L'avantage principal du système à plaques de friction est sa simplicité et donc son coût relativement bas. En cas de séisme de forte magnitude, il y a dissipation d'énergie par frottement au niveau des plaques. En revanche, il n'y a pas d'isolation sous une faible sollicitation sismique.

L'inconvénient principal du système à plaques de frottement est la difficulté de maîtriser le déplacement pendant et après le séisme. Un déplacement résiduel de la structure trop important après séisme peut être pénalisant, voir inacceptable. Cet inconvénient majeur fait que, en pratique, ce type d'isolation n'est pas utilisé tel quel mais toujours combiné à d'autres technologies par exemple [55] :

- isolation par alliages à mémoire de forme ;
- isolation par boîtes à ressorts.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons illustré en revue les différents types de dispositifs utilisés dans l'isolation sismique. Nous avons présenté leur principe de base ainsi que leurs avantages.

L'utilisation des appuis parasismiques au niveau des fondations est une technique et un moyen pour affaiblir au maximum les déplacements de la structure soumise aux résidus des effets sismiques transmises par les fondations à la structure ; ils consomment très peu d'énergie tout en ayant des performances, en général, supérieures à celles des systèmes passifs.

Devant une telle variété de dispositifs d'isolation, la question sur le comportement des structures dotées de ces dispositifs se pose. De plus, la performance des systèmes d'isolation dépend aussi du comportement de la structure isolée.

L'utilisation des appuis parasismiques a abouti de nos jours à un emploi opérationnel efficace des laboratoires spécialisés.

L'excitation doit être appliquée avec beaucoup de soin pour approprier le déplacement maximum de l'appui. La mesure proprement dite du déplacement de l'appui doit être compatible avec les dimensions du type d'appuis conçus, calculés et modélisés selon, soit un appui convenable ou à un choix d'appuis conformément au site et au projet.

Cela peut confirmer que, lorsqu'une structure sur appuis parasismique sera à l'état limite ultime, elle subit que des déformations élastiques faibles donc réversibles ; cela revient à confirmer encore que l'intensité des forces horizontales dont les structures isolées sont soumises est très faible par rapport aux structures non isolées.

Ce qui explique que les appuis parasismiques ont la capacité de découpler la structure des ces fondations, afin de permettre le libre mouvement des appuis transmis par le sol sans pour autant ne laisser passer que de très faibles mouvements à la structure, voir même négligeable, c'est-à-dire que la structure devient stable avec un minimum de réponse sismique prévu par les calculs.

CHAPITRE 3

CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTEME D'ISOLATION A LA BASE ET PROCEDURE TECHNIQUE DE MODELISATION DU SYSTEME

3.1 Introduction

L'analyse du comportement dynamique des structures a une importance technique considérable. La prise en compte des problèmes dynamiques des structures isolées ou non est nécessaire pour garantir la fiabilité des structures dans de nombreuses applications. C'est le cas des structures soumises aux séismes.

Les isolateurs dans les structures assurent un système de découplage et montrent les possibilités et les limites d'analyse, ce qui permet une prévision de comportement et un rôle important à jouer dans le développement d'une structure sensible à son environnement dynamique, ce dernier va constituer le point de départ des activités, pour la phase de conception et de dimensionnement.

Ce qui exige une analyse de la configuration porteur/matériel ou la communication de l'excitation au matériel par le porteur est le siège de l'opération.

D'où les interactions dynamiques entre le sol, isolateur et structure (porteur/matériel) imposent des modèles mathématiques de chaque partie afin de voir s'il y a convergence de résultats entre les calculs et les essais.

Dans ce chapitre on présente encore une procédure comment définir des données et des lois de comportement (matériaux) pour une simulation numérique par une proposition des méthodes de calculs. De nombreux contacts intervenant dans les assemblages mécaniques correspondent à un contact suivant un plan tangent ou une ligne des éléments que l'on suppose rigides en présence, qui peuvent constituer la famille des contacts Hertiens.

3.2 Intervenants du système d'isolation

La connaissance du site ou de l'environnement réel permet de simuler mécaniquement la structure. Le choix du système d'isolation ne peut être adopté que si l'on connaît :

- parfaitement le sol ;
- le type de structure pour pouvoir modéliser ;
- type de modèle d'isolation ;

- disposer des outils de simulation numériques et maîtriser leur fonctionnement.

3.3 Différent cas du système d'isolation

Deux cas de figures se présentent séparément pour qu'on puisse se prononcer sur les phases de calcul de simulation, d'essais et de l'efficacité du système d'isolation:

- support à isoler (isolateurs posés soient au niveau du sous sol soient à inter-étage de la structure). C'est lorsqu'il s'agit d'un confortement d'un immeuble stratégique ou de sauvegarde d'un patrimoine culturel ancien ou l'usage d'un étage d'un bâtiment est changé imprévisiblement, dans ces conditions c'est le support qui doit être isolé.
- structure à isoler (isolation à la base de la structure). C'est lorsqu'il s'agit d'une nouvelle conception à étudier.

3.4 Mesure de l'efficacité du système d'isolation

Le système d'isolation est dit efficace si la transmissibilité [3] du système porteur au système porté est de telle sorte que pour :

- support à isoler, il faut que le rapport de la force transmise à la base et l'amplitude de la force excitatrice soit inférieure à l'unité ;
- structure à isoler, il faut que le rapport du déplacement total maximum de la structure et l'amplitude du déplacement de la base soit toujours inférieur à l'unité.

Ce sont des conditions qui doivent faire l'objet d'un calcul au préalable pour juste confirmer la transmissibilité (T_R) de la force du système d'isolateur à la structure par $T_R < 1$ ou bien il faut que pour les deux cas de figures le rapport de fréquences (β) soit supérieur à la valeur de racine de deux. En se référant sur l'exemple :

a/ d'une machine vibrante (tournante) et mal équilibrée sur support à un degré de liberté type ressort amortisseur. Le déplacement en régime permanent $x(t) = \frac{(P_0)}{K} \lambda \sin(\omega t - \Theta)$ et la force des rigidités équivalentes du système $F_K = k \cdot x(t) = P_0 \lambda \sin(\omega t - \Theta)$. De même la force d'amortissement est comme suit $F_c = C \frac{(P_0)}{K} \lambda \omega \sin(\omega t - \Theta)$ et comme la force maximum est la résultante entre ces dernières forces qui $F_{\max} = (F_K^2 + F_C^2)^{1/2}$.

En récapitulant cette force $F_{\max} = [(P_0 \lambda)^2 + (2\zeta\beta P_0 \lambda)^2]^{1/2}$ et qui devient

$F_{\max} = P_0 \lambda [1 + (2\zeta\beta)^2]^{1/2}$ de là vient le rapport de la force maximum à la base et de l'amplitude de la force appliquée, que l'on a appelé transmittance ou fonction de transfert

du support $T_R = F_{\max}/P_0$ et que λ est le facteur d'amplification dynamique qui représente le rapport de l'amplitude de la réponse en mouvement permanent et du déplacement statique qui serait la force P_0 . et la transmittance devient $T_R = \frac{\sqrt{1+(2\beta\zeta)^2}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2\beta\zeta)^2}} < 1$.

La transmittance est une fonction de transfert qui est une caractéristique du comportement dynamique d'un système, elle est utilisée pour représenter le rapport entre les modules des variables d'entrée et de sortie des systèmes définies par des équations linéaires ;

b/ support à isoler porté par système ressort-amortissement sur un plancher soumis à des mouvements harmoniques verticaux.

Structure à isoler, il faut que le rapport du déplacement total maximum de la structure et l'amplitude du déplacement de la base soit toujours inférieur à l'unité. C'est le cas d'une nouvelle conception d'une structure isolée à la base.

Le déplacement du plancher par rapport à la base $x(t) = x_{so}\beta^2 D\sin(\omega t - \Theta)$ et ajoutant vectoriellement le mouvement à la base on peut montrer que le mouvement total du plancher $x_{tot}(t) = x_{so}[1+(2\zeta\beta)^2]^{1/2} D\sin(\omega t - \Theta)$ et $T_R = \max x_{tot}(t)/\max x_s(t)$

$T_R = \frac{(x_0)}{(x_{max})} \lambda \sqrt{1+(2\beta\zeta)^2} < 1$ d'où $T_R = \frac{\sqrt{1+(2\beta\zeta)^2}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2\beta\zeta)^2}} < 1$, Avec : $\beta = \omega/\omega > \sqrt{2}$ et ζ comme amortissement dépendant des matériaux constitutifs de la structure, des assemblages des différents éléments de la structure et des liaisons avec le milieu environnant. Il est donc évident que l'amortissement tend à réduire l'efficacité d'un système d'isolation en vibration pour toute fréquence supérieure au rapport critique $\beta = \sqrt{2}$.

Généralement la structure a un déplacement relatif lorsqu'elle est soumise à un chargement horizontal qui engendre un déplacement du support.

On a : $x_S(t) = x_{so}\sin\omega t$ et $X_T(t) = x_R(t) + x_S(t)$

x_T : Déplacement total (sol + structure)

x_S : Déplacement du sol

x_R : Déplacement relatif à la structure

D'où le déplacement relatif à la structure sous l'effet d'une force à sa base est comme suit :

$$M\ddot{x}_R + C\dot{x}_R + Kx_R = M\ddot{x}_S = P_{eff}^R(t) = M\omega^2 x_{so}\sin\omega t \quad \text{avec} \quad P_{0\,eff}^R = M\omega^2 x_{so}$$

$$\text{et} \quad x_R(t) = \frac{(P_0)_{eff}^R}{K} \lambda \sin(\omega t - \Theta)$$

Et le déplacement total (c'est-à-dire le déplacement relatif de la structure avec le déplacement du sol) est comme suit :

$$M\ddot{x}_T + C\dot{x}_T + Kx_T = M\ddot{x}_S + C\dot{x}_S = P_{eff}^T(t) = Kx_{so}\sqrt{1+(2\beta\zeta)^2} \sin(\omega t + \alpha)$$

avec $(P_0)_{eff}^T = Kx_{so}\sqrt{1 + (2\beta z)^2}$

$x_T(t) = \frac{(P_0)_{eff}^T}{K} \lambda \sin(\varpi t + \alpha - \Theta)$ avec $\text{tg}\alpha = 2\beta z$ et $\text{tg}\Theta = \frac{2\beta z}{1-\beta^2}$ et comme le

déplacement de la base dépend du type de sol, de cette hypothèse on peut extraire le chargement horizontal et de là on fait apparaître la valeur de la pulsation d'excitation (ϖ).

En fonction de l'allure des spectres d'accélération moyenne des différents sols comme indiqués sur la figure 3.1, on peut en déduire, évaluer et confirmer cette fréquence d'excitation.

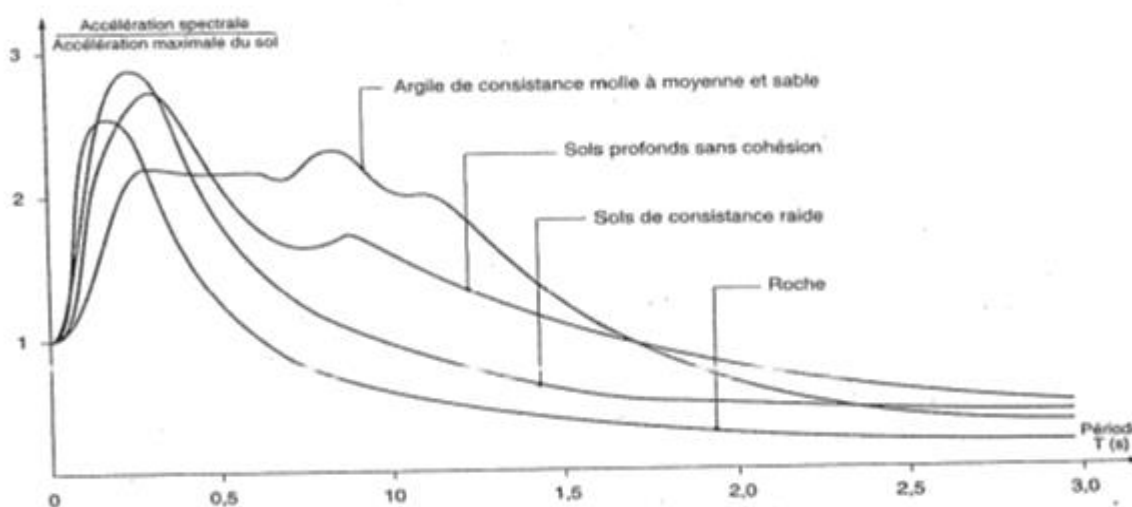


Figure 3.1 : Allures des spectres d'accélération moyenne pour différents type de sols

3.5. Conception et description du modèle

Le modèle d'isolateur à étudier est (pour le même type de bâtiment à différent usages et différent étages) composé de deux plaques d'acier rigides carrées séparées par des billes en acier sphérique placées dans des cavités de la plaque inférieure.

Le but principal de l'étude du modèle est de s'assurer que la structure n'exerce aucun mouvement même infiniment petit afin de maintenir l'immobilité et la stabilité et éviter tout déplacement très faible qu'il soit de la structure., comme constaté par d'autres isolateurs utilisés, lorsque le modèle est excité dans une des directions horizontales par un chargement horizontal du sol. Dans le cas échéant un autre système d'isolateur de même type peut être ajouté si cela est vraiment nécessaire pour un site répertorié à haut risque sismique.

3.6. Composition et structure du modèle

Le modèle est composé de quatre éléments à savoir, deux tôles épaisses en acier, des billes en acier et du lubrifiant.

Le nombre et le diamètre des billes d'acier ainsi que les dimensions et l'épaisseur des plaques d'acier dépendent de la charge verticale et de l'usage de chaque structure.

La forme du modèle est composée de quatre parties différentes de corps indéformable :

1- Plaque en acier carrée supérieure : cette première partie est fixée sous le dernier plancher de la superstructure au droit de chaque colonne, qui est une surface plane d'épaisseur dépendante aussi de la charge verticale. Cette partie permet le glissement et la rotation des billes sans pour autant avoir la moindre statique déformation au niveau des points de contact avec les billes et même d'observer l'infinitésimal petites compression des surfaces au niveau des points de contact.

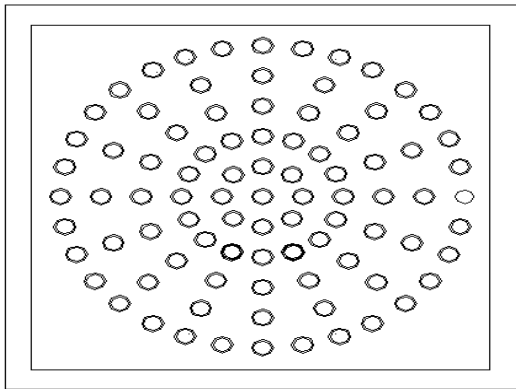


Figure 3.2 : Plaque inférieure en acier

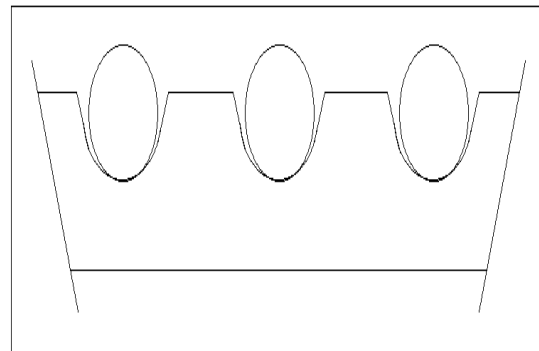


Figure 3.3 : Coupe aux niveaux de la plaque présentant des concavités

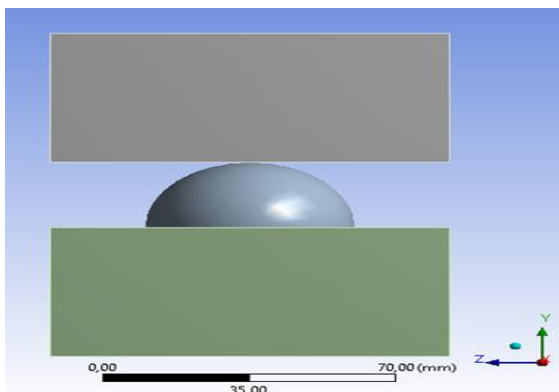


Figure 3.4 : Les différents éléments

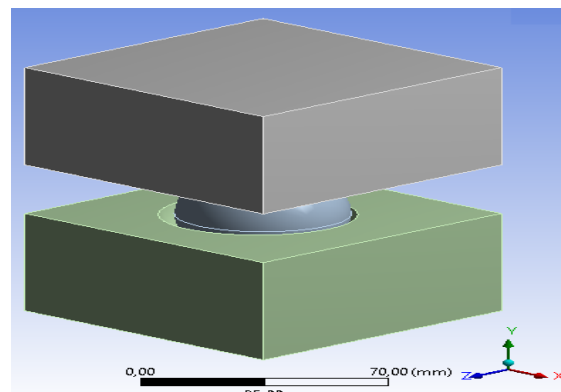


Figure 3.5 : Eléments de l'isolateur enperspective

Le nombre et les dimensions des billes en acier sphériques sont conçus en fonction de la charge verticale indiquée à la figure 3.2 et en fonction du type et de l'usage du bâtiment.

2- Les billes sphériques en acier et plaque d'acier inférieure : les billes peuvent se déplacer dans n'importe quelle direction horizontale et posées sur des formes concaves usinées de la plaque d'acier inférieure en fonction des critères de fonctionnement particulier de roulement.

Ce point d'articulation permet aux balles sphériques de tourner sur elles-mêmes comme représenté sur les figures 3.4 et 3.5 . La rotation par glissement des billes sphériques pourrait provoquer une très faible ou légère interface de frottement, ce qui est le but et le moyen d'éviter tout transfert de la force de cisaillement à la structure isolée, les trois éléments de l'isolateur doivent être de même résistance mécanique élevée.

3- La tôle au niveau inférieur présentant des concavités selon le nombre des billes là ou ces dernières peuvent tourner et glisser à l'intérieur.

4- Le lubrifiant : en tant que quatrième partie du système, élimine toute rigidité fournie par le frottement du au glissement et la rotation des billes en acier sphériques d'une part et d'autre part, rendre la forme concave très lisse par imprégnation de lubrifiant compatible. Les figures 3.7 et 3.8 montrent le lubrifiant à l'intérieur de la forme concave ou se trouvent les billes sphériques.

Un lubrifiant sélectif, de longue durée de vie et d'une viscosité nécessitant une certaine attention à cause des frottements relatifs des corps en contact. Un lubrifiant sélectif doit disposer d'une viscosité qui caractérise la résistance à la vitesse de glissement des éléments de l'isolateur entre eux. L'énergie qu'elle permet de dissiper facilite le glissement et augmente la fréquence de roulement des billes à l'intérieur des formes concaves de la plaque.

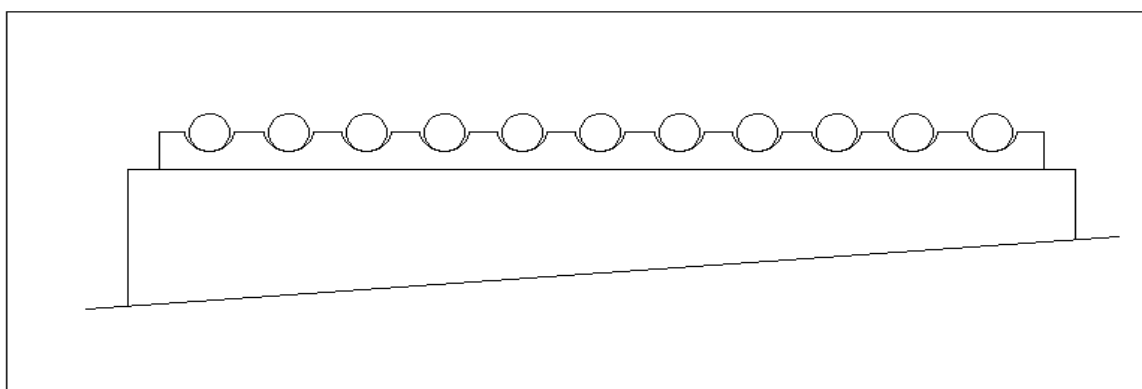


Figure 3.6 : Billes sphériques à l'intérieur des formes concaves de la plaque inférieure

3.7 Protection et étanchéité du modèle

Toute la superficie de la bille considérée comme partie active de roulement doit toujours rester parfaitement propre et bien lubrifiée. La protection et l'étanchéité ont pour rôle d'assurer la permanence de ces deux facteurs vitaux durant la durée de roulement, en empêchant les agents polluants et les impuretés de pénétrer à l'intérieur de la surface concave de la plaque ou se déroule le roulement de la bille et d'entraver la graisse en la retenant afin d'éviter le glissement de la bille entre elle.

Les surfaces à la périphérie de la tôle inférieure à abriter par une étanchéité dynamique sont mobiles c'est-à-dire lors d'un séisme le socle supportant la partie inférieure de l'isolateur sera en mouvement par rapport à la tôle située à la partie supérieure fixée au plancher haut du sous-sol. Pour que cette enceinte soit dite parfaitement étanche si et seulement si aucune quantité de lubrifiant qui y est contenu ne peut en sortir et aucune particule étrangère ne peut y pénétrer.

3.7.1 Protection sans frottement

Ce dispositif est basé sur l'effet de renforcement par injection de la graisse à l'intérieur des concavités et dans les passages plus ou moins étroits entre les billes. Ces protections ne donnent lieu pratiquement à aucun frottement et aucune usure et qui peuvent convenir pour les brutales grandes vitesses de rotation des billes dues aux mouvements des fondations et les températures élevées.

La procédure de graissage doit être centralisée et complètement automatisée car les points à lubrifiés sont nombreux et la pénétration au centre de la tôle doit être bien contrôlée. A cet effet les lubrifiants doivent être envoyés sous pression par une pompe avec réseau de canalisations jusqu'à atteindre et envahissent les différentes surfaces des concavités

figure 3.7.

La quantité de lubrifiant (graisse) prévue doit être suffisante, compte tenu de sa pérennité et des conditions de fonctionnement (température...). Le lubrifiant doit être consistant, c'est sa propriété principale car elle exprime la résistance à la déformation de la graisse et elle diminue lorsque la température augmente.

Les lubrifiants enrichis ou non, sont des graisses à base de pétrole qui sont les plus utilisées. Produit de synthèse (fabriqué chimiquement) et les huiles représentent plus de 95% du total des lubrifiants utilisés.

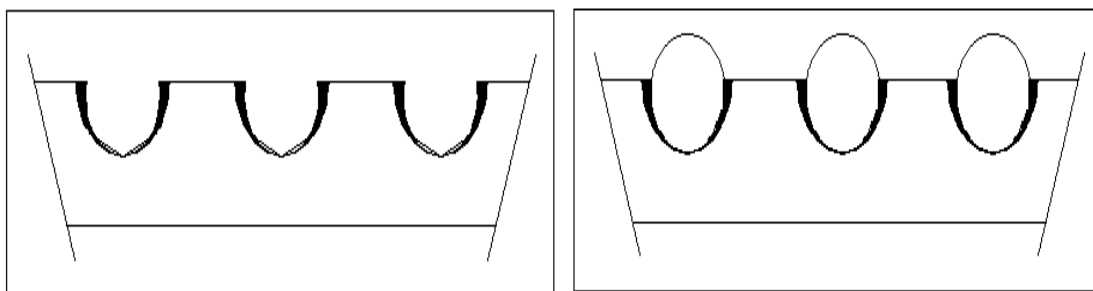


Figure 3.7 : Lubrifiant et billes en acier à l'intérieur des formes concaves

3.7.2 Les joints à frottements

Les joints exercent une pression au niveau des surfaces infiniment petites qui sont des points de contact des billes. Pour le bon fonctionnement du système et la bonne conservation de la performance des éléments de l'isolation, on doit veiller pour éviter ainsi la pénétration des impuretés et de l'humidité et/ou les pertes de lubrifiant figure 3.7 (diminution de la quantité de graisse).

3.8 Composantes des systèmes d'isolation à la base

Les composantes (caractéristiques) essentielles d'un système d'isolation typique sont :

- Un appui capable de transmettre les charges verticales mais ayant une faible rigidité horizontales et cette faiblesse est due au fait que les billes glissent et tournent sur elles même, c'est le noyau de l'isolateur. Cette rigidité est le paramètre clé dans l'augmentation de la période de vibration des différents modes en particulier le mode fondamental et par conséquent la réduction totale des forces sismiques transmises à la structure ;
- Un mécanisme de dissipation d'énergie (amortisseur) qu'il soit d'ordre naturel issu de la structure ou d'ordre matériel est incorporé au niveau de l'appui.

3.9 Techniques de modélisation du système d'isolation

3.9.1 Méthodes d'analyse du modèle

Le système a trois degrés de liberté, à savoir deux directions horizontales U_x , U_y et une rotation autour de l'axe vertical. Les éléments assurant les points de contact comme les billes métalliques et les différentes plaques (comme représenté à la figure 3.1), doivent être composés d'atomes durs. La déformation de chacun peut influencer la géométrie. Les billes se trouvent uniquement directement au-dessus et au-dessous du centre du point de contact au niveau des distributions des charges illustré à la figure 3.2, les déformations latérales peuvent perturber la rotation de la balle. Le type de roulement et la surface de contact sont circulaires, ce qui entraîne une distribution de pression semi-elliptique déterminée analytiquement.

Un système d'isolation en acier dur représenté sur différentes figures 3.1 et 3.3. Le mouvement de la bille sphérique (tournante sur elle-même et glissante dans la forme concave) est régi par la charge sismique et des cycles sismiques répétés.

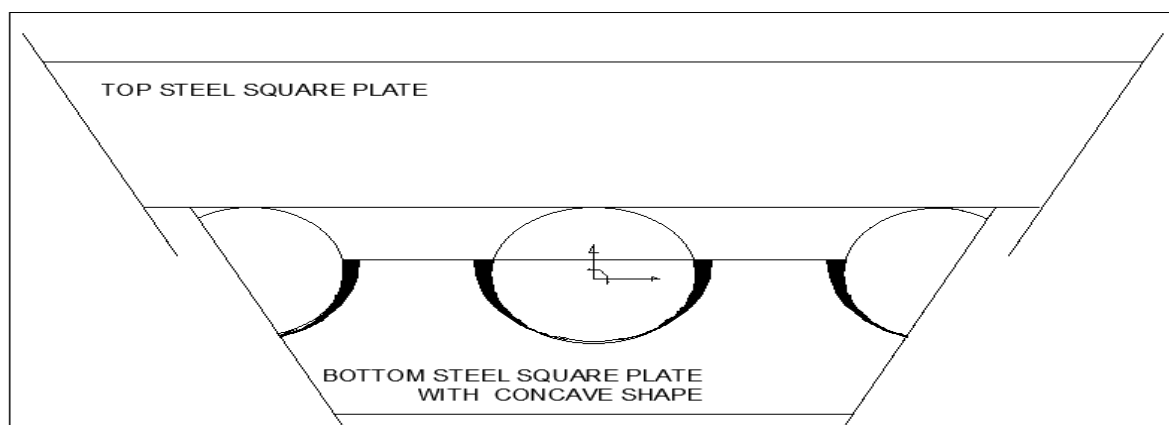


Figure 3.8 : Différents éléments de l'isolateur

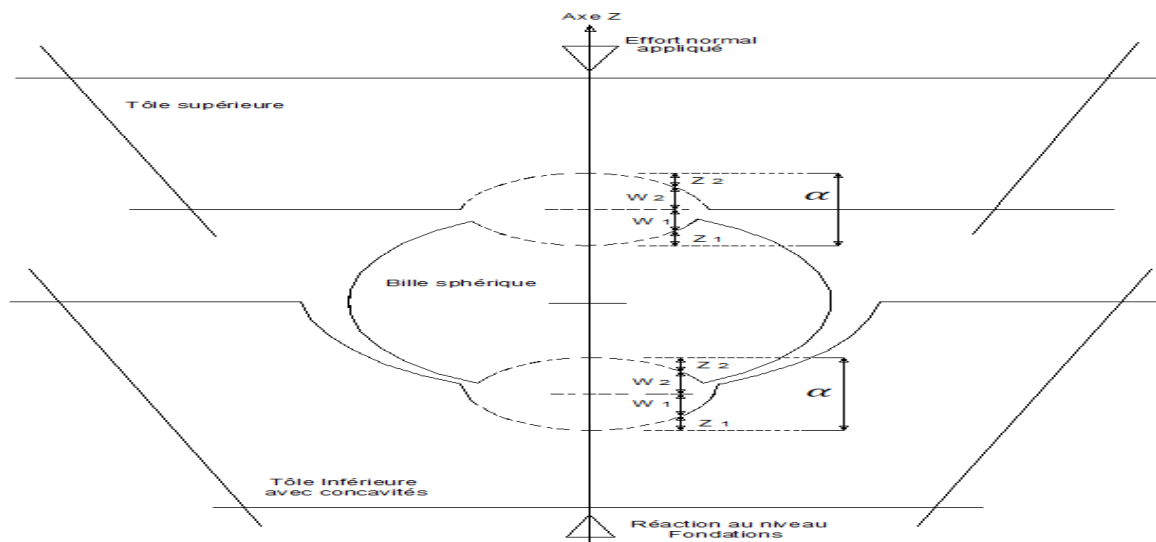


Figure 3.9 : Illustration de la répartition des pressions et déformations au niveau des points de contact

3.9.2 Analyse analytique

Heinrich Hertz fut le premier à avoir traité le problème de contact entre solide élastiques à surface lisse sous charge vertical. Il a fait des calculs et des vérifications par des mesures expérimentales la répartition de la pression sur la surface de contact et la distribution des contraintes dans le corps à l'aide des fonctions du potentiel newtonien.

3.10 Mécanique du contact et de l'impact

Des contacts intervenant dans l'ensemble des éléments de l'isolateur correspondent à des contacts suivant un point ou une surface infiniment petite si l'on idéalise les éléments en présence et en les supposant rigides. Ce type de contact constitue la famille des contacts Hertiens et les éléments de solutions ont été proposés Heinrich Hertz (1881-1896) [56]. L'application de la théorie de Hertz au point de contact permet de prévoir la forme et les dimensions de la surface de contact, la répartition de l'effort vertical et la répartition des contraintes au niveau du point de contact comme l'indique la figure 3.9

3.11 Contact sphère plans

3.11.1 Contact élastique

Le système de contact est classé comme hertzien s'il vérifie les conditions suivantes :

- les matériaux doivent être homogènes, isotropes obéissant à la loi de Hooke généralisée et pour qu'ils restent dans le domaine élastique il ne faut pas qu'ils accusent de déformations ;
- une contrainte produite est insuffisante pour créer une déformation permanente après déchargement, elle est parfaitement élastique. C'est-à-dire que le contact sphère plan reprend sa position initiale, phénomène réversible (pôles de la sphère) comme indiqué sur la figure 3.2 ;
- le contact des interfaces doit être très lisse et doit rester petit point de vue dimension par rapport au rayon principal des surfaces non déformée ;
- les points de contact ou surfaces sont continus et peuvent être représentée par des polynômes du second degré avant déformation si elles existent.

Le point de contact entre les éléments est le plan tangent commun aux différents pièces de part et d'autre (contact des billes avec la plaque supérieure et la plaque inférieure au niveau des concavités comme le montrent les figures ci-dessous figure 3.10. Une surface de contact se crée entre les pièces à travers la charge verticale transmise d'une pièce à l'autre. La figure ci-dessous représente aussi le contact de Hertz sphère plan [56].

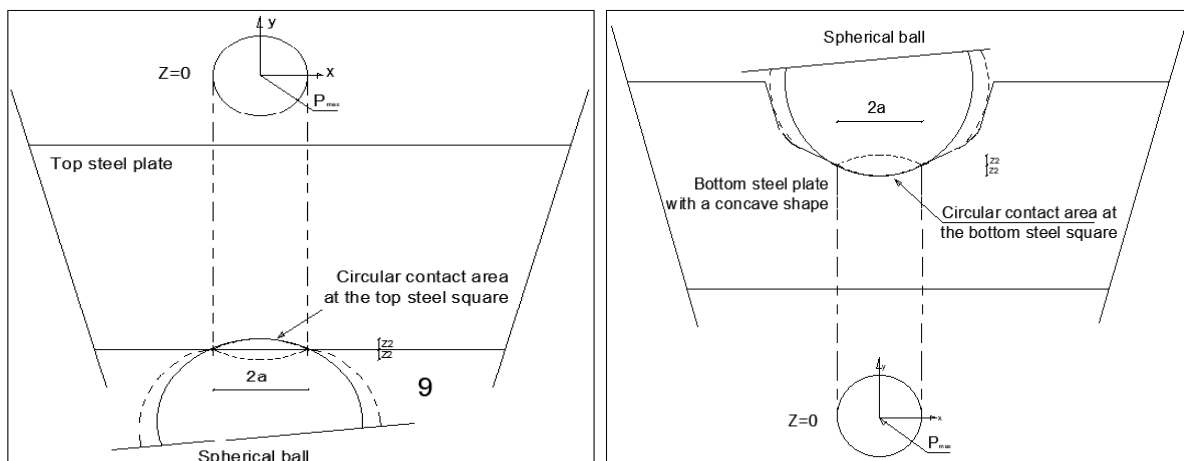


Figure 3 .10 : Dimensions des déformations au niveau des points de contact

Déformation maximum au niveau de chaque point de contact (le haut et le bas de la sphère). Ces efforts surfaciques illustrent à l'échelle microscopique et génèrent une répartition de contraintes spécifiques à la pièce dans la région de contact et qui cette dernière provoque des déformations permanentes sous forme de poinçonnement ou d'empreintes qu'il faudrait prévoir de les éviter comme indiqués sur les figures 3.9 et 3.10.

Ceux-ci peuvent être l'origine des frottements créés à leur tour des préjudices, lors des roulements et des glissements des billes pendant le chargement horizontal du au sol. Le contact illustre la prédiction de la déformation et les dimensions de la pression de contact de surface.

3.11.2 Contact élastoplastique

Quand le contact est sphère plan, l'application progressive de la charge verticale se produit en deux phases figure 3.11.

la déformation commence dans la zone au niveau du centre de la surface de contact. Au fur et à mesure que l'on augmente la charge, cette zone s'élargie en produisant une déformation élastoplastique, le phénomène devient irréversible ce qui engendre au niveau du contact une déformation qui reste comme une empreinte indéfiniment ;

au-delà de cette élastoplasticité il va y avoir une plasticité qui se développe et cela va permettre d'augmenter le rayon de contact ; et enfin, une déformation plastique significative demeure indéfiniment même après déchargement, ce qui va nuire au déplacement de la bille.

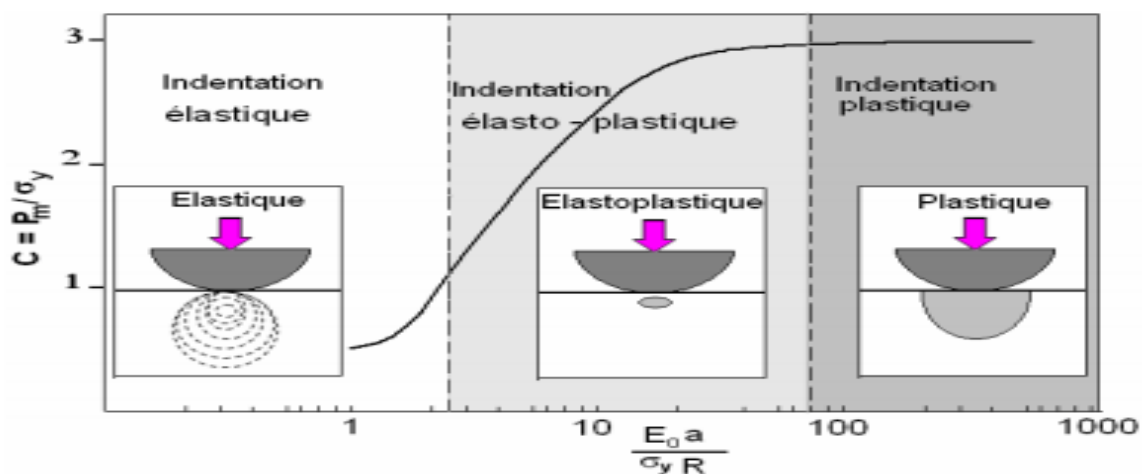


Figure 3.11 : Définition des domaines élastique, élastoplastique et plastique

3.12 Simulation de l'impact par calcul numérique

L'équation pour la répartition de la pression de contact avec la surface et la compression lorsque deux entités pressent chaque côté l'une contre l'autre, le déplacement se produisant dans les deux côtés, comme illustré aux figures 3.8 et 3.9

$$dT_1 = Z_1 + \omega_1 \quad (1)$$

dT_1 : est la déformation de la plaque supérieure et inférieure sous la pression

$$dT_2 = Z_2 + \omega_2 \quad (2)$$

dT_2 : est la déformation de la bille au niveau supérieur et inférieure sous la réaction.

$$Z = Z_1 + Z_2 \text{ et } \omega = \omega_1 + \omega_2 \quad (3)$$

$$dT = dT_1 + dT_2 \quad (4)$$

1,2 : sont les déformations de la bille sphérique sur chaque point de contact.

$$dT = Z + \omega = Z_1 + \omega_1 + Z_2 + \omega_2 \quad (5)$$

dT : est la déformation totale de différents éléments du système ou la déformation totale des plaques et de la bille au niveau supérieure et inférieure.

La deuxième partie est une zone circulaire (2a) de la déformation ou de contact est par les calculs de Hertz, car les différentes entités se touchent, provoquant une distribution de pression semi-elliptique (sphère sur une gorge sphérique et plane sur une plaque plate). Cela nous permet de calculer le temps du changement éventuel ou de contrôler les différentes parties des isolateurs.

$$a^3 = 3.P.R.(1 - \nu^2)/4E \quad (7)$$

ν : Poisson's ration

$$P_{max} = 3P/2\pi i.a^2 \quad (8)$$

P : est la pression maximale de contact appliquée au centre de la zone de contact circulaire c'est-à-dire sphère plan ; le centre de déplacement est une fonction hautement non linéaire de la charge et consiste à déterminer la zone comprimée.

L'équation générale pour obtenir l'effort de contact ou l'effet de compression de chaque côté de la bille métallique sphérique, soumise à la charge appliquée à la partie supérieure de la bille et à la réaction à la partie inférieure de la bille est basée sur la théorie de contact élastique [57]. Cette théorie permet d'établir différentes relations liant l'effort normal, aux propriétés élastique et à la géométrie de contact.

Considérant qu'il s'agit d'une approche mutuelle sous charge axiale, les deux corps doivent être homogènes et isotropes, obéissant à la loi de Hooke et subissent de faibles déformations et rotations (domaine élastique linéaire), linéairement élastiques et les zones en contact sont

parfaitement lisses et sans frottement. Les dimensions de la région de contact déformée restent infiniment petites comparées au rayon principal des surfaces non déformées.

La zone de contact est infinitésimale petite, mais non techniquement nulle. Au sens mathématique du terme, la limite de la surface du point de contact est proche de zéro.

Toutes ces conditions de contact répertoriées comme Hertzien. Cela permet de considérer la relation par des polynômes de second degré constituée de trois axes orthogonaux comme une équation générale pour une surface au niveau du contact avant déformation, la théorie est la suivante :

Supposant deux corps indéformables sans aucune contrainte mathématiquement en contact, les corps sont supposés linéairement élastiques isotropes.

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2gzx + 2hxy + 2ux + 2vy + 2wz + d = 0 \quad (9)$$

Comme les plans x-x' et y-y' sont dans le même plan tangent au plan d'axe normal z-z' qui est parallèle à la charge axiale.

Selon ces considérations, qui permettent de supposer que le plan tangent (dz/dx et $dz/dy=0$) et à l'origine, $x=0$, $y=0$, $z=0$, donc $d=0$ et se différencie par rapport à X.

$$2ax + 2cz \frac{\partial z}{\partial x} + 2fy \frac{\partial z}{\partial x} + 2gz + 2gx \frac{\partial z}{\partial x} + 2hy + 2u + 2w \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

Aussi, à l'origine, $x=0$, $y=0$, $z=0$, $\frac{\partial z}{\partial x} = 0$ (plan tangent). Et par conséquent $u=0$

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2gzx + 2hxy + 2ux + 2wz = 0 \quad (11)$$

Pour obtenir une approximation de cette équation pour laquelle sera adéquate à notre modèle nous utiliserons les séries de Taylor, alors:

$$f[(x + \delta x), (y + \delta y)] = f(x, y) + \delta x \frac{\partial f}{\partial x} + \delta y \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{1}{2!} \left[\delta x^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + 2\delta x \delta y \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} + \delta y^2 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right] + \text{termes d'ordre élevés (négligés)} \quad (12)$$

Dérivons par rapport à x

$$2a + 2cz \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2c \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + 2fy \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2g \frac{\partial z}{\partial x} + 2g \frac{\partial z}{\partial x} + 2gx \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2w \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (13)$$

Aussi, à l'origine, $x=0$, $y=0$, $z=0$, $\frac{\partial z}{\partial x} = 0$ et par substitution dans l'équation on a:

$$2a + 2w \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\frac{a}{w}$$

La dérivée seconde de l'équation (9) par rapport à y

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\frac{b}{w}$$

De même l'équation (10) par rapport à y

$$2C \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} + 2C_z \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} + 2f \frac{\partial z}{\partial x} + 2f_y \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} + 2g \frac{\partial z}{\partial y} + 2gx \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} + 2h + 2w \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = 0 \quad (14)$$

Aussi, à l'origine, $x = 0, y = 0, z = 0, \frac{\partial z}{\partial y} = 0, \frac{\partial z}{\partial x} = 0$ en substituant dans l'équation

$$2h + 2w \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = 0$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = -\frac{h}{w}$$

Substituant maintenant dans la série de Taylor, équation (12), et relativement z comme f(x,y)

$$f[(x + \delta x), (y + \delta y)] = z = f(0,0) + x \frac{\partial z}{\partial x} + y \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{1}{2!} \left[\frac{x^2 \partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{2xy \partial^2 z}{\partial x \partial y} + y \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right]$$

donc

$$z = \frac{1}{2} \left(-\frac{a}{w} x^2 - \frac{2hxy}{w} - \frac{by^2}{w} \right)$$

et elle peut être écrite comme :

$$z = Ex^2 + Fy^2 + 2Hxy \quad (15)$$

Si z est constant (dans n'importe quel plan parallèle au plan xy) l'équation (15) sera une ellipse avec ces principaux axes de rotation. Si maintenant les coordonnées des axes sont alignés avec les axes principaux les xy vont disparaître comme illustre la figure 3.5.

Pour cela faisant la transformation:

$$x = X \cos \theta - Y \sin \theta$$

$$y = X \sin \theta + Y \cos \theta$$

Où l'angle est donné par $\tan 2\theta = 2H / (E-F)$.

$$Z = \text{Constante} \cdot X^2 + \text{Constante} \cdot Y^2 \quad (16)$$

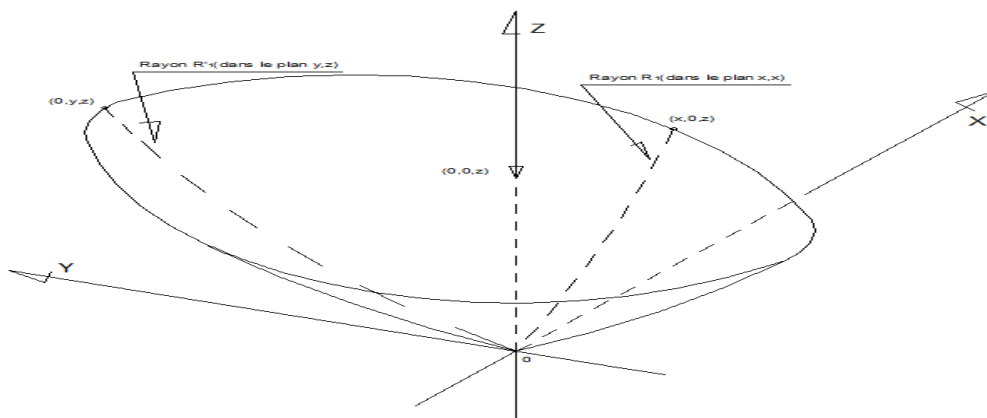


Figure 3.12 : Les rayons de courbure selon trois dimensions des éléments du modèle

Il est nécessaire de déterminer ces constantes dans l'équation (16) en termes de dimensions.

$$z = Ax^2 + By^2 \quad (17)$$

Appliquons cette équation pour la distribution de pression ou de compression aux surfaces de contact. Le déplacement se présente au niveau des deux corps dans l'axe des z, tout en considérant que la force appliquée est parallèle à cet axe figure ci-dessous.

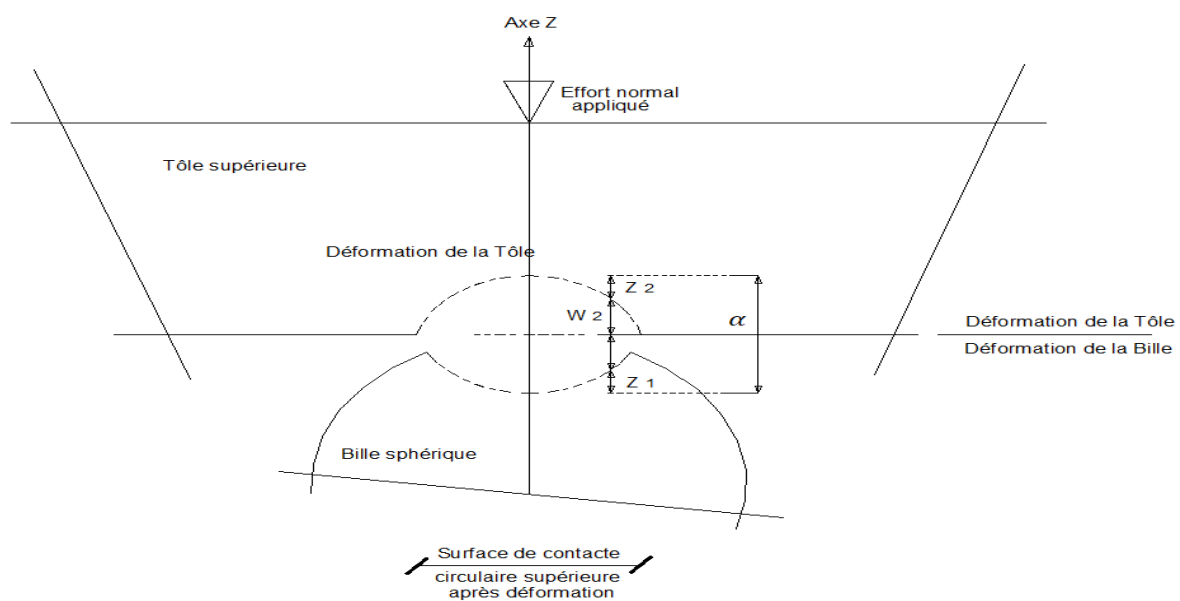


Figure 3.13 : Déformation de la partie supérieure de l'isolateur de : soit la tôle ou soit la bille

Les déplacements w_1 et w_2 sont des déplacements comme indiqués sur les figures 3.13 et 3.14 à l'intérieur de chaque corps au point de contact.

a : est la valeur de la somme de $(w_1 + w_2)$ à l'origine que nous cherchons, Landau et Lifshitz[58].

La distribution des charges verticales est illustrée dans la figure ci-dessous.

$$(z_1 + w_1) + (z_2 + w_2) = a$$

$$(z_1 + w_1) + (z_2 + w_2) > a$$

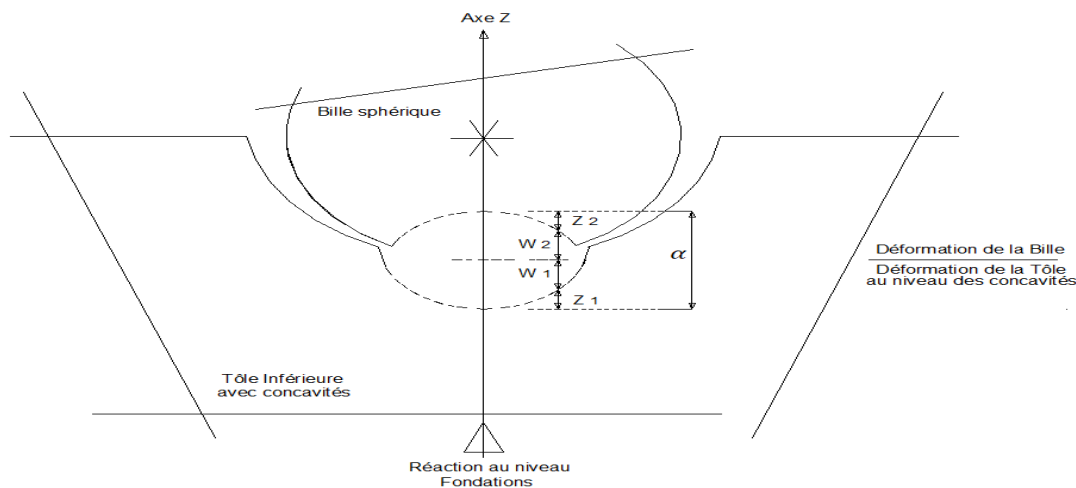


Figure 3.14 : Déformation de la partie inférieure de l'isolateur de : soit la tôle ou soit la bille

L'axe étant choisi tel que,

$$z_1 + z_2 = Ax^2 + By^2 \quad (18)$$

Il en est de même l'équation (18), devient :

$$Ax^2 + By^2 + (w_1 + w_2) = a \quad (19)$$

Considérons les composantes de pression au point (x', y') à la surface de contact comme $p(x', y')$

Voir l'exemple de Prescott [59], comme plane et la déformation au point (x, y) d'où la pression est donnée par :

$$w(x, y) = \frac{1-\delta^2}{\pi E} \cdot \frac{p(x', y')}{r} dx' dy' \quad (19)$$

Ou r est la distance de (x, y) à (x', y') . Après, l'utilisation du théorème de superposition, le déplacement au point (x, y) du à la pression sur la surface A est donné par :

$$w(x, y) = \frac{1-\delta^2}{\pi E} \iint A \frac{p(x', y')}{r} dx' dy' \quad (20)$$

En substituant l'équation (19) dans l'équation (20) on aura alors :

$$\left(\frac{1-\delta_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\delta_2^2}{\pi E_2} \right) \iint A \frac{p(x', y')}{r} dx' dy' = a - Ax^2 - By^2 \quad (21)$$

ou la numérotation 1 et 2 désigne les constantes élastiques des deux corps.

$$w_1/w_2 = \left(\frac{1-\delta_1^2}{E_1} \right) / \left(\frac{1-\delta_2^2}{E_2} \right)$$

Si l'ellipsoïde est uniforme point de volume et densité, on peut voir cela, Kellogg [60] par conséquent le potentiel des points à l'intérieur de l'ellipsoïde est donné par :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Le potentiel peut s'exprimer de la manière la plus simple, il est comme suit :

$$\Phi(x, y, z) = \iiint \vartheta \frac{p \, dx' \, dy' \, dz'}{((x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2)^{1/2}}, \quad (22)$$

$$\iint \left(1 - \frac{x'^2}{a^2} - \frac{y'^2}{b^2}\right)^{1/2} \cdot \frac{dx' \, dy'}{r} = \frac{1}{2} \pi a b \int_0^\infty \left(1 - \frac{x^2}{a^2 + \psi} - \frac{y^2}{b^2 + \psi}\right) \cdot \frac{d\psi}{((a^2 + \psi)(b^2 + \psi)\psi)^{1/2}}. \quad (23)$$

Comparant entre l'équation (21) et l'équation (23) on voit que les expressions à gauche et à droite ont la même forme, limitées par la surface de contact l'ellipsoïde et la distribution de pression sur les surfaces de contact est donnée par :

$$p(x, y) = k \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)^{1/2}$$

$$v_1 = \frac{(1 - \delta_1^2)}{\pi E_1} \text{ et } v_2 = \frac{(1 - \delta_2^2)}{\pi E_2}$$

Les modules d'Young doivent être les mêmes ($E_1 = E_2$) et les expressions doivent être valables pour toutes les valeurs de x et y à l'intérieur des corps en contact.

Le système est considéré comme si les deux corps en contact sont des sphères.

$$z_1 = \frac{x^2}{D_1} + \frac{y^2}{D_1}$$

$$z_2 = \frac{x^2}{D_2} + \frac{y^2}{D_2}$$

Si les sphères ont des diamètres D_1 et D_2 et à partir de l'équation (17) on aura :

$$z_1 + z_2 = x^2 \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}\right) + y^2 \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}\right)$$

En comparant cette équation avec l'équation (18) on aura ce qui suit :

$$A = B = \frac{3}{4} P(V_1 + V_2) \int_0^\infty \frac{d\psi}{(a^2 + \psi)^2 \psi^{1/2}}$$

Après tout calcul fait pour deux sphères en contact peut être assimilé au contact d'une sphère avec une tôle plane de même nuance, seulement dans les calculs un diamètre d'une des sphères tend vers l'infini. La formule de déformation devient alors $a = dT$.

$$a = \frac{(3\pi)^{2/3}}{2} \cdot p^{2/3} \cdot (V_1 + V_2)^{2/3} \cdot \left(\frac{1}{D}\right)^{1/3} \quad (24)$$

Après, calcul et supposant à partir de la formule (8) la sphère en contact avec les plans. La formule dT de la déformation ou de la compression sera adéquate au modèle du sujet de recherche qui devient la suivante :

$$dT = (3\pi/2)^{2/3} \cdot P^{2/3} \cdot V^{2/3} \cdot (1/D)^{2/3} \quad (25)$$

$$V = (1 - \nu^2)/2\pi E$$

$$dT = (3/2E)^{2/3} \cdot P^{2/3} \cdot (1/D)^{1/3} \quad (26)$$

Les sphères et les deux plans sont toutes en acier et le module de Young adopté est de 2.1GPa. Comme la compression est axiale au niveau des points de contact dT, la formule (25) sera :

$$dT = 0.000040 \cdot P^{2/3} \cdot D^{-1/3} \quad (27)$$

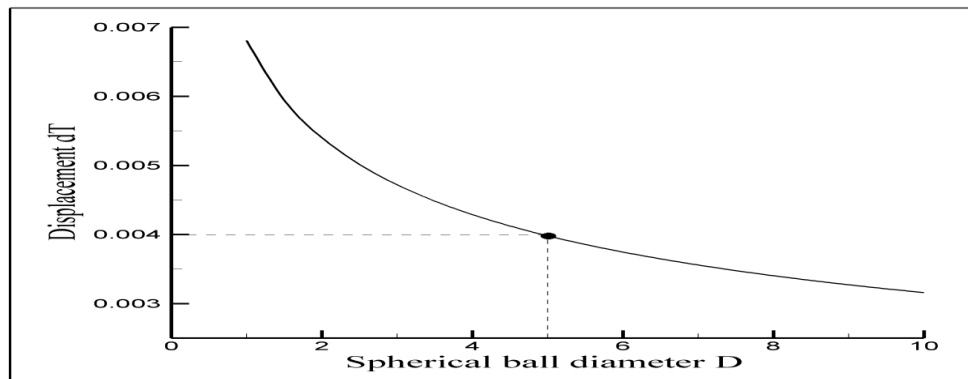


Figure 3.15 : Variation des diamètres des billes sphériques en fonction des charges verticales et déplacements $dT=f(D)$

La courbe de divers diamètres de la bille est tracée selon la figure 3.15 de la formule 27 [41]. La compression de la sphère dépend de la dimension du diamètre et de la charge verticale. Cette courbe permet de sélectionner le matériau élastique le plus approprié. L'acier typique et le plus courant utilisé dans les aciers de roulements est le 100Cr6 et qui satisfait les conditions du module d'Young adopté.

C'est un des aciers qui constituent 70 à 80 % des aciers utilisés pour le roulement. Il est destiné à résister à l'usure par frottement, par abrasion ou aux chocs. Conformément à la courbe figure 3.15. On adopte comme cinq centimètres de diamètre des billes et restant dans la même dimension pour les épaisseurs des tôles.

3.13 Caractéristiques de l'acier 100Cr6

Ces aciers sont très couramment désignés comme aciers indéformables. L'acier 100Cr6 est utilisé à l'état trempé et revenu, caractérisé par des niveaux de dureté élevée à température ambiante (63 à 66 HRC). Mais, contrairement aux aciers pour travail à chaud, leur résistance

à l'adoucissement des hautes températures est relativement faible. De ce fait, leur utilisation se limite à des domaines ne nécessitant pas une exposition prolongée ou répétitive au-delà des températures de 200-260°C.

3.14 Caractéristiques mécaniques

Sensible aux chocs, bonne ténacité, dureté et bonne résistance à l'usure. Leur module d'élasticité aux environ de $E = 210$ GPa. Il faut que l'acier soit de marque (100Cr6) pour qu'il puisse faire face à une sollicitation verticale à l'état de service qui est une charge permanente de la structure.

3.15 Analyse élastique

La bille sphérique et les plaques sont toutes en acier. La charge axiale appliquée requise au point de contact doit garantir uniquement la plage de déformation élastique (construction de dix étages dans cette étude). La charge verticale générée dans la superstructure est directement proportionnelle à la déformation du système d'isolation.

La charge verticale de compression totale supportée par chacune des parties isolantes peut confirmer le même résultat de la courbe tracée en utilisant la formule 27 avec les autres approches. Les propriétés mécaniques suivantes peuvent être utilisées pour concevoir et confirmer n'importe quelle partie de l'isolateur comme indique la figure 3.9 contrainte déformation.

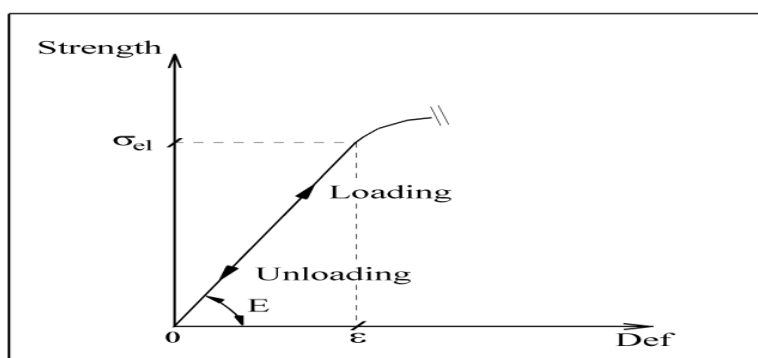


Figure 3.16 : Courbe contrainte déformation

$$\sigma_{el} = W_{max}/s(13)$$

$$E = tg\alpha = \sigma_{el}/\varepsilon(14)$$

Où : E est le module de Young et $P=w_{max}$: charge verticale maximale appliquée à la bille.

Les différents éléments du système dépendent de la charge de compression axiale (contact des points supérieur et inférieur). Le module de Young peut être déterminé en chargeant et en déchargeant progressivement chaque élément de l'isolateur jusqu'à atteindre la limite élastique de résistance tout en restant dans la phase résiliente, sans aucune déformation permanente ou de rupture de chaque point de contact entre les différents éléments, comme indiqué à la figure 3.9

L'objectif de cette étude est donc de mettre au point un dispositif de caractérisation par ces types de chargement. En ce qui concerne le coefficient de Poisson, il est supposé avoir une valeur constante pour les différentes composantes du système (modèle).

En effet des travaux antérieurs réalisés par Y.Gachon[61]etF.Ledrappier [62] avaient permis de mettre en évidence l'intérêt de modèles dans le domaine de la mécanique ou de dispositifs similaires pour l'étude de la résistance aux chocs [63].

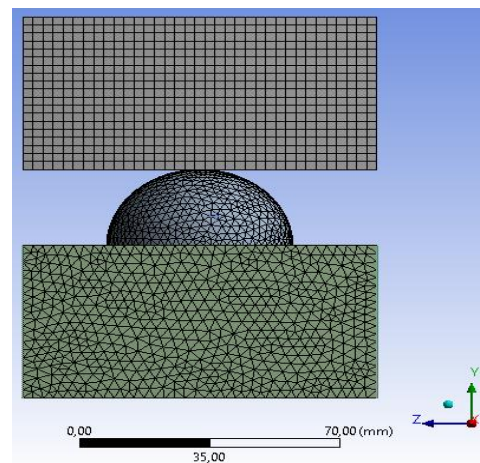
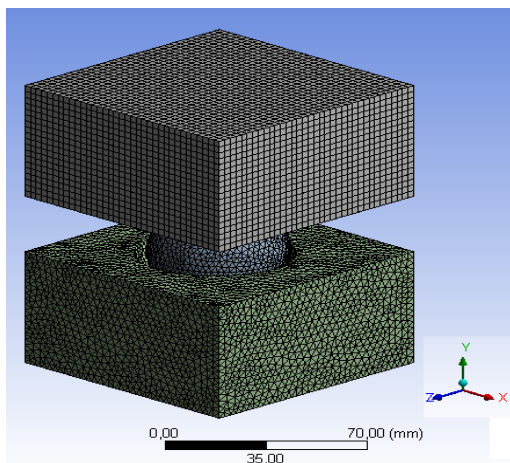


Figure 3.17 : Perspectives des différents éléments Figure 3.18 : Maximum des nœuds des éléments

3.16 Approche par éléments finis

Une analyse par éléments finis réalisée sur des éléments de l'isolateur ayant des formes de structures différentes et la charge appliquée sont deux plans de symétrie orthogonaux, afin d'augmenter la précision de l'analyse [64] à l'aide du logiciel ANSYS, pour comparer et confirmer le principe de convergence d'une approche numérique en adoptant les mêmes caractéristiques mécaniques, mêmes dimensions des différentes parties du système et

adoptant le même chargement appliqué. Les figures 3.12 et 3.13 indiquent les nœuds de maillage complets des différentes parties de l'isolateur données par le résultat du logiciel ANSYS.

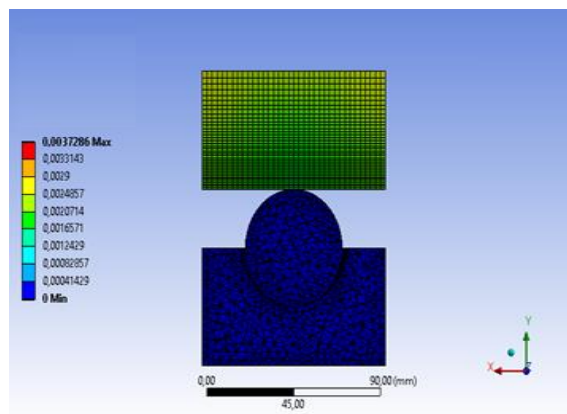
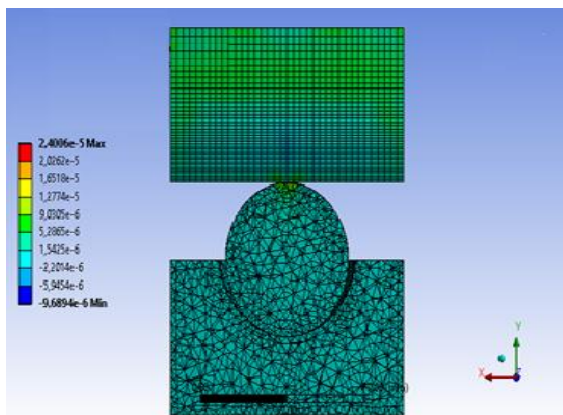


Figure 3.19 : Déplacement total (mm)

Figure 3.20 : Contrainte principale normale (MPa)

Il y a :

254438 nœuds de maillage au total pour les différentes parties de l'isolateur pour une boule sphérique.

100944 nœuds en prise dans la plaque d'acier supérieure.

36899 nœuds maillés de la boule sphérique.

116595 nœuds maillés de la plaque concave en acier inférieure.

Nous adoptons le même type d'acier de différentes parties de l'isolateur le 100Cr6 avec la nuance 210GPa comme module de Young (désignation européenne ISO683-17, norme standard). Les figures 3.17 à 3.20 indiquent, le déplacement, la déformation et le nombre total de nœuds de maillage des différentes parties de l'isolateur à l'aide du logiciel ANSYS. Les résultats obtenus sont selon la base de données du matériau 100Cr6 et 210GPa comme module de Young.

Le type d'éléments finis suit la forme de l'élément à étudier. Comme la tôle supérieure présente une forme régulière le type d'éléments finis est quadratique de quatre nœuds par contre la sphère et la tôle inférieure présentent des formes irrégulières l'une par sa forme circulaire et l'autre par des concavités qui se trouvent à l'intérieur de la tôle et le type d'éléments finis est triangulaire à trois nœuds.

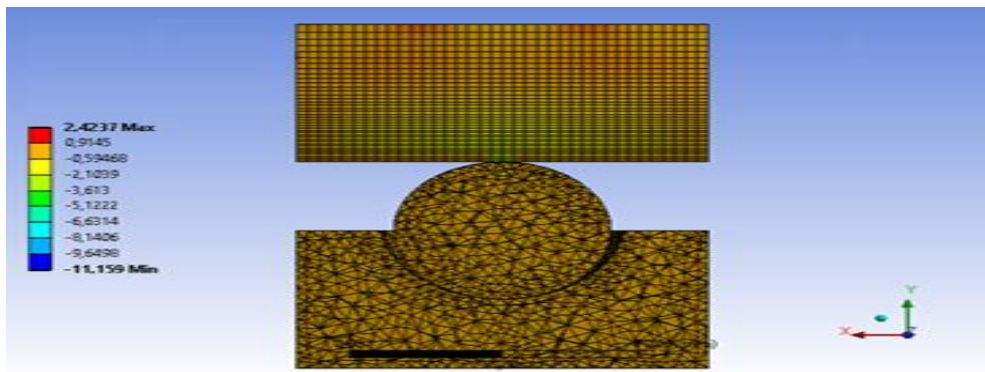


Figure 3.21 : Déformation élastique des éléments (mm/mm)

L'analyse chimique du 100Cr6 avec 210GPa comme module de Young est conformément à la norme ISO683-17.

Les propriétés élastiques des matériaux sont liées aux liaisons interatomiques. C'est pourquoi la statique moléculaire permet de calculer les constantes d'élasticité des matériaux [65], elle peut également varier en fonction des propriétés finales et peut être amélioré par un traitement thermomécanique des surfaces extérieures (film) de chaque élément pour une éventuelle marge de sécurité à prévoir pour l'usure.

Les propriétés mécaniques de l'épaisseur tout autour de la sphère et des plaques sont très dures, gardent la stabilité dimensionnelle en fonction de la disposition des atomes, solides dans un motif cristallographique défini et lui permettant de supporter facilement la charge verticale par rapport aux précédentes, car c'est la zone de contraintes de traction qui apparait nettement à proximité de l'interface Hassani [66].

3.17 Résultats et discussion

Le modèle physique est conçu pour avoir un système totalement découplé entre la structure et la base, autrement dit, un véritable comportement non linéaire en termes de relation, de résistance, de déformation, de force restreinte dans un système isolé et rigide dans la direction verticale. La structure est à l'état limite de service maximal durant tout le long de sa durée de vie. La conception de ce modèle va faire face à un très grand concept de déplacement pour l'isolement et pour réduire le déplacement des fondations due au mouvement du sol.

La suggestion des voiles de contreventement périphériques en plus des voiles à l'intérieur au niveau du sous-sol peuvent augmenter la capacité de résistance de la fondation en réduisant le

mouvement de la base dans les isolateurs par leur grande inertie dans les deux sens de la structure. Le système de contreventement et le système d'amortissement sont là pour parer au mouvement du sol. La sensibilité des structures isolées en cas de degré de non-linéarité dans la superstructure est due à la grande rigidité de cette dernière par rapport à la rigidité de l'appui.

3.18 Résultats analytiques

En utilisant la formule dT (27) et le schéma correspondant à la figure 3.15, il est possible d'obtenir l'effet de compression par utilisation directe de la charge appliquée entre les deux points de contact. Le résultat requis est obtenu dans le graphe de la figure 3.14, plus le diamètre de la boule sphérique est élevé, moins les déformations sont faibles (déplacement et compression), plus elles sont considérées comme négligeable ou même ignorée.

3.19 Résultats des analyses élastiques

Seules les propriétés des caractéristiques mécaniques des différentes parties du système sont concernées par la charge de compression axiale et peuvent être déterminées à condition que la limite élastique ne soit pas dépassée, comme le montre la figure 3.9.

Nous pouvons remarquer une légère déformation négligeable dans la plage d'élasticité de souche ; tout cela dépend du diamètre de la sphère. La théorie de l'élasticité a exprimé la relation du déplacement à différents points de contact ou sous-couches des sphères avec un plan dû à la pression de la charge axiale sur un autre point en tant que donnée du système.

3.20 Résultats éléments finis

Les performances des résultats de simulations numériques comme illustrés aux figures 3.12, 3.13 et 3.14, en assumant les mêmes valeurs de différentes dimensions du système et le même module de Young.

Les résultats de l'approche par éléments finis moyennant Ansys comme logiciel à l'échelle d'une bille concernant chaque point des éléments à savoir comme mentionnés dans les figures 3.19, 3.20 et 3.21 :

- les déplacements totaux ;
- les contraintes principales normales ;

- les déformations élastiques.

Les résultats de la totalité de tous les éléments du système d'isolation au niveau de tous les socles de fondations peuvent être confirmés par un logiciel puissant appelé station de calcul.

3.21 Conclusion

Le but premier est de contrôler la réduction des forces transmises à la structure et éventuellement les déplacements absolus à la superstructure. Il y a une multitude de systèmes de dissipation d'énergie, les plus courants tels que les amortisseurs hydrauliques (viscous damper) et les amortisseurs à base de friction (comportement plastique ou élastoplastique).

L'efficacité des systèmes d'isolation augmente avec la différence entre leur rigidité horizontale avec celle de la superstructure car plus cet écart est grand, plus faibles ou nulles sont les accélérations communiquées à la structure.

La réduction recherchée des accélérations si elles existent n'est réalisée que dans le mode fondamental d'oscillation.

Le point de contact entre les éléments défini comme étant infiniment petit peut créer une déformation considérable si la boule sphérique, la plaque supérieure et la plaque inférieure ne sont pas infiniment dures, isotropes, homogènes. La limite élastique du matériau ne doit pas être dépassée afin d'empêcher la boule sphérique de se déformer, glisser et de tourner sur elle-même.

Les géométries des éléments de l'isolateur entre eux au voisinage du contact, la position relative, le torseur de liaison entre les éléments, la résultante de la composante verticale, les propriétés mécaniques à savoir l'élasticité et le cisaillement des matériaux utilisés sont les informations à rassembler pour cette étude.

Les charges verticales doivent être axiales au niveau des points de contact pour la détermination des dimensions des différents éléments et afin de caractériser le type d'acier du point de vue déformabilité, ténacité, dureté et bonne résistance.

L'approche par éléments finis moyennant le Logiciel Ansys indique la répartition des réseaux de maillage des éléments qui tendent à exprimer les déplacements, les contraintes, les déformations, le type d'élément fini et la taille de ce dernier qui est de l'ordre de 10^{-3} mm (micron).

La forme de la courbe qui, donnée par effet de compression axiale indique les différents diamètres de la bille et les dimensions des tôles à adopter.

CHAPITRE 4

CARACTERISTIQUES MECANIKES ET COMPOSITION CHIMIQUE DES ELEMENTS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons comment se manifeste le modèle adopté sous l'effet des efforts normaux et selon ces caractéristique mécaniques et chimiques.

6.2 Caractéristiques mécaniques des éléments

La valeur du déplacement dans le tableau 4.1 doit être maximale en fonction de la charge de la structure (charge verticale), de sorte que le principe de cette recherche ne peut tolérer aucune déformation minime qu'elle soit des éléments en acier. Celle ci aussi pourrait influencer ou perturber la rotation des billes sphériques au niveau des points de contact.

Tableau 4.1 : Résultats des caractéristiques mécaniques des éléments de l'isolateur par l'utilisation du logiciel Ansys 12.0

Weight (KN)	Displ max (mm)	Deformation ϵ	Strength σ (MPa)	E.Young Modulus (Gpa)	Volumic Mass (Kg/m)	Compressibility Modulud (Pa)	Poisson Coef	Shear Modulus (Pa)	Specific Heat (J/KgC)
26.5	0.00129 96	0.0000488	9.7637	200	7850	1.6667*10ex10	0.3	7.7923*10ex1 0	434

C'est l'un des objectifs principaux, qui est la condition qui conduit à augmenter le module de Young à la valeur $E = 210\text{GPa}$ (déduite du potentiel d'interaction entre les atomes) ce qui permet le maintien à une coaxiabilité intacte sans déformation.

La bille d'acier glisse à l'état solide et tourne sur elle-même en gardant la même forme sphérique de séisme en séisme, sans aucune déformation permanente ni limite d'élasticité dépassée. C'est un acier de grande résistance à l'usure, il est très peu déformable à la trempe, très dur, et abrasif.

Ceci explique que l'attraction de molécules de l'acier génère une chaleur de friction très faible ou négligeable, par dissipation d'énergie. La limite d'élasticité, la limite à la rupture et la

déformation dépendent non seulement de la composition chimique, des traitements thermomécaniques mais aussi surtout de l'état de livraison.

4.3 Composition chimique des éléments

Le matériau faisant l'objet de notre étude est un acier qui peut être classé, selon sa composition chimique (Tableau 4.2), dans la catégorie des aciers faiblement alliés de travail à froid à très haute résistance à l'usure et à la déformation le 100Cr6.

Tableau 4.2: Composition chimique des différents parties de l'isolateur (100Cr6 comme Matériau adopté).

%	C	SI	Mn	p	S	Cr	Mo
Min	0.93	0.15	0.25	/	/	1.35	/
Max	1.05	0.35	0.45	0.025	0.015	1.60	0.10

D'après la bibliographie et les résultats de ces analyses, nos aciers possèdent les caractéristiques indiquées par le fournisseur (BOHLER) et confirment donc que cet acier appartient à la famille des aciers faiblement allié au chrome pour un travail à froid.

4.4 Propriétés

Les aciers sont des composés de fer (Fe) et de carbone (C), le fer étant majoritaire à dureté élevée et excellente résistance à l'usure et comme l'acier utilisé doit être par définition développés pour résister aux phénomènes de corrosion essentiellement dus à l'humidité avec une augmentation de pourcentage en chrome et avec l'addition d'autres éléments comme le nickel, le molybdène, le cuivre, l'azote, le titane etc.

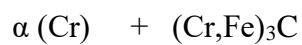
Cette composition peut ralentir la vitesse de propagation de corrosion qui détruit la couche passive au niveau des films de chaque élément et peut même provoquer la propagation des fissures et diminue l'endurance des métaux des éléments du modèle. Ces aciers sont à roulements tels que billes, rouleaux, aiguilles, cônes, anneaux etc.

4.5 Microstructure de l'acier 100Cr6

L'acier nous a été livré à l'état de recuit de coalescence. L'aspect caractéristique de cet état, observé par microscope optique, est représenté par la figure 4.1.

La structure se présente sous forme de matrice ferritique alliée dans laquelle sont distribués de fines carbures d'une façon uniforme et de grosses particules de carbure de chrome eutectique de type $(Cr,Fe)_3C$.

D'après la composition chimique de l'acier 100Cr6, sa structure, après recuit de coalescence, se définit comme suit :



En solution solide carbure de chrome



Figure 4.1 : 100Cr6 recuit.

4.6 Désignation de l'acier 100Cr6

Nous pouvons voir que la composition chimique du matériau 100Cr6 avec 210MPa comme module de Young est conforme à la norme ISO 683-17, comme indiqué dans le tableau 4. 2.

Tableau 4.3: Norme et désignation de l'acier

Norme Désignation de l'acier 100Cr6	Désignation de l'acier 100Cr6
AISI	52 100
NF A 35-573/4	100C6
EN 10027	100Cr6

C'est un acier pour roulement ou le roulement assure le mouvement des billes autour d'elles même en présence de lubrifiant. Les différents éléments de l'isolateur sont en acier au chrome très chargés en carbone (tableau 4.3), à teneur comprise entre 0.93 et 1.05 %. La courbe ci-dessous peut nous orienter sur la température qu'il faudrait adopter pour telle ou telle teneur en carbone.

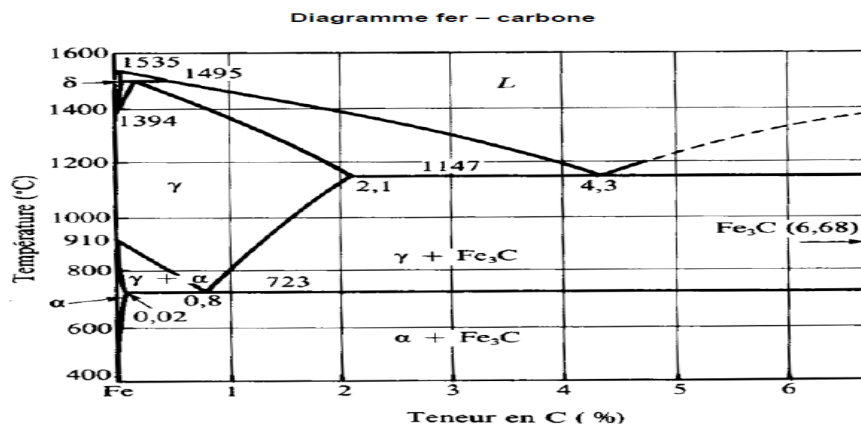


Figure 4.2 : courbe indiquant la température adoptée à la teneur en carbone

Ces aciers doivent avoir pour caractéristiques mécaniques une très grande homogénéité, dureté (car ils doivent supporter l'usure des systèmes de charges verticales permanente importantes par contact) et une stabilité aux températures (120°-250°) en cas d'incendie.

4.7 Résistance à l'usure et coefficient de frottement

Avant utilisation, tout système de modèle d'appui parasismique doit faire l'objet d'une impérative procédure de validation technique pour s'assurer de la fiabilité des éléments du modèle afin d'effectuer le contrôle de conformité avant la mise en place [67].

L'usure d'un matériau est souvent caractérisée par la perte de masse en fonction du temps. Elle est généralement influencée par la rugosité des facettes des éléments de l'isolateur c'est-à-dire le film de chaque élément qui présente un coefficient de frottement dépend des paramètres liés au test cela d'une part et d'autre part par les conditions environnementales et par sa dureté. Selon Polar et al [68], des coefficients de frottement de 0.45 à 0.8 [68-69] ont été mesurés à température ambiante (25°C), contre des billes type 100Cr6 en acier.

La mesure de la dureté des films varie avec les conditions d'élaboration [66-67]. Cette nuance est destinée aussi et également aux utilisations qui imposent une haute résistance aux

déformations, cloquages, empreintes, l'usure sous charges verticales et charges horizontales élevées alternées. Donc ces principaux composants doivent avoir une dureté élevée, limite d'élasticité et de même une haute résistance à la fatigue.

4.8 Traitement du matériau

Ce sont les traitements thermiques qui fixent la microstructure de l'acier et par conséquent les propriétés mécaniques des matériaux. Les dimensions de tous les éléments du modèle de l'isolateur doivent subir un cycle de traitement thermique afin d'atteindre une dureté conséquente et l'amélioration des performances mécaniques des pièces soumises à divers sollicitations.

4.9 Choix des paramètres des traitements thermiques

4.9.1 Les conditions de trempe

L'ensemble des considérations théoriques de notre acier nous permet d'être plus sélectif quant au milieu favorisant une vitesse de refroidissement optimale qui est le bain d'huile. Quant à la température d'austénitisation adéquate, elle est choisie selon la gamme suivante : 850°C comme illustré dans la figure 4.3 précédées d'un préchauffage à 650°C/30 minutes.

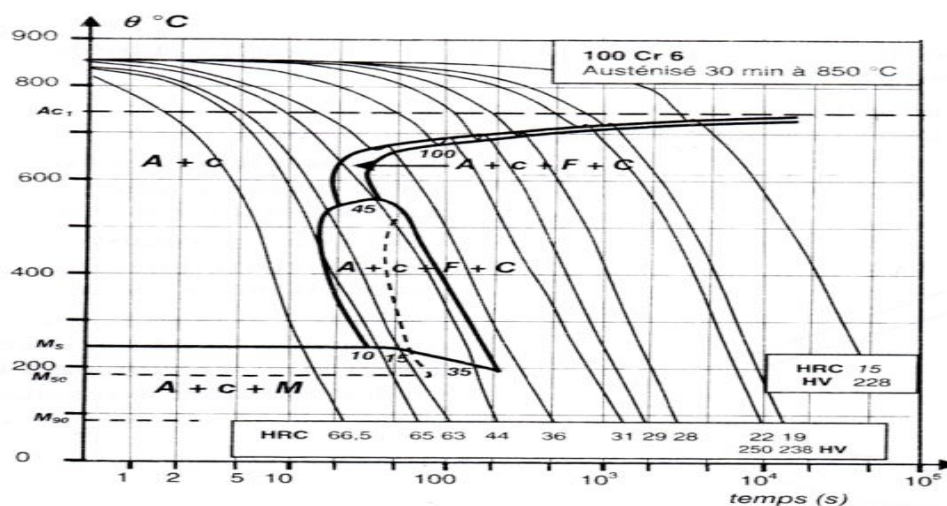


Figure 4.3 : Courbe TRC 100Cr6

L'acier est maintenu pendant 1h 30min suivant les épaisseurs de chaque élément pour être refroidi rapidement dans l'huile. Il possède une très bonne trempabilité selon la figure ci-dessus.

4.9.2 Aptitude à la trempe

Tremper un métal consiste à le chauffer puis le refroidir. La trempe à l'huile aux environs de 1150° Ce qu'on appelle une austénisation et essentiellement avec l'ajout d'éléments d'alliages pendant quatre minutes doivent permettre un refroidissement rapide permettant d'obtenir un acier très dur comme l'indique la figure 4.4.

Pour des sollicitations de plus en plus fortes, un traitement de revenu à 500°C pendant une heure et demie afin de réduire au minimum le risque de rupture et la résistance à la corrosion ; cette procédure est la spécialisation des chercheurs en mécanique. C'est un processus visant à améliorer la résistance de l'acier, à fixer sa microstructure et par conséquent les propriétés mécaniques du matériau (la dureté, résistance à la traction et la limite élastique).

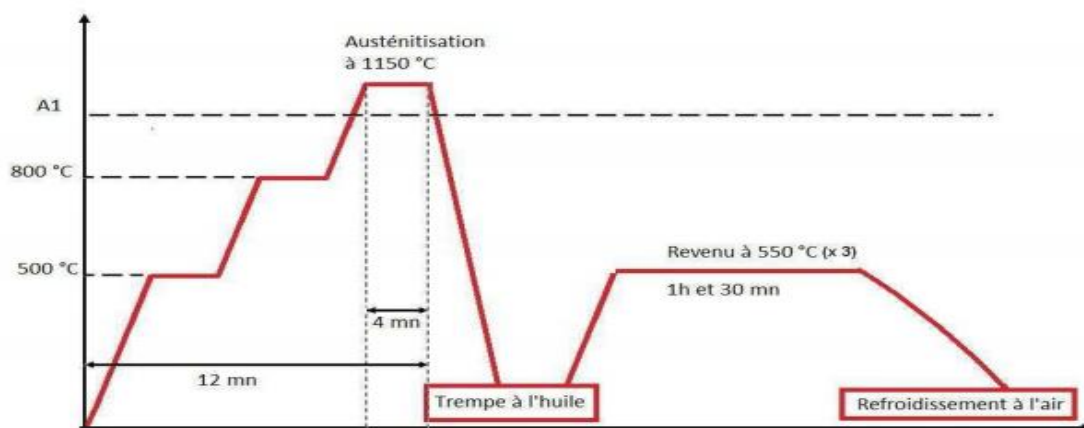


Figure 4.4 : cycle de traitement réalisé sur l'acier

Sensible aux chocs, bonne ténacité, bonne résistance à l'usure. Leur module d'élasticité $E=210\,000\text{ N/mm}^2$.

Tableau 4.4 : Valeurs de la trempe à l'huile (austénisation) et de revenu par réchauffement

Re (N/mm ²)	Rm(N/mm ²)	Rr(N/mm ²)	A%	Dureté après trempe	K _v (j/cm ²)
550 - 850	750 - 850	850 - 1250	10 - 13	63 – 66 HRC	3.5

4.9.3 Le revenu

Le revenu est donc pratiqué après l'opération de trempe. Cela consiste à réchauffer de nouveau à 550°C le métal pendant une heure et demie et afin de permettre la diminution notable des contraintes internes résiduelles existantes suite à la trempe. Ce réchauffement de l'acier provoque une modification de sa structure (de la martensite à la sorbite).

Selon la dureté désirée, la température de revenu est choisie à 550°C suivant la figure 4.5 ci-dessous, et ce pour la température de trempe retenues. Le chauffage s'effectuait pendant un maintien d'une heure suivi d'un refroidissement à l'air.

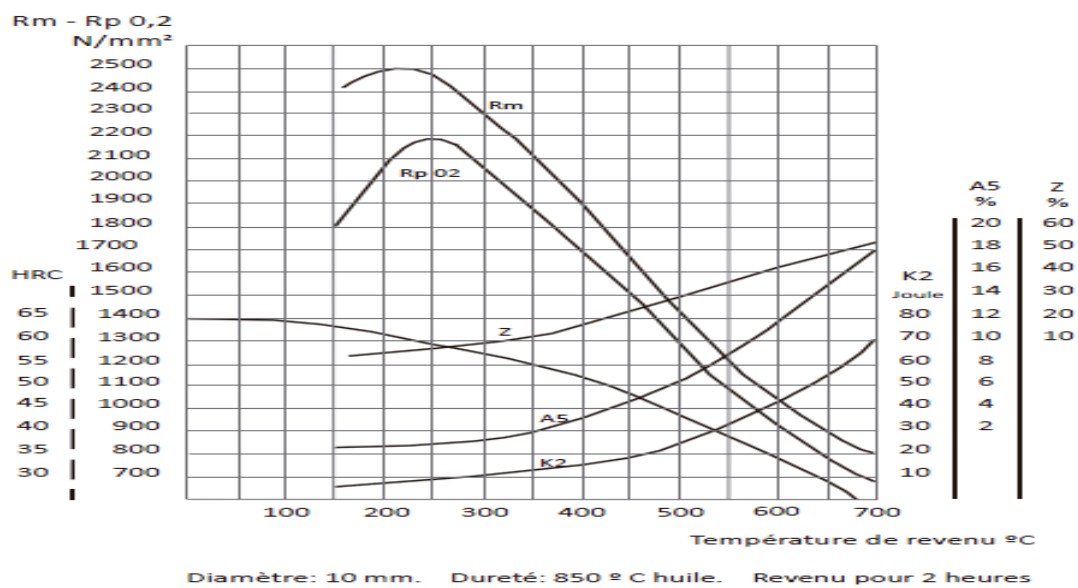


Figure 4.5 : Diagramme de Revenu Acier 100Cr6.

Cette procédure peut rendre ou diviser le matériau de chaque élément de l'isolateur en deux éléments de même nuance seulement le premier élément est appelé le film le deuxième est le substrat comme le montre la figure ci-dessous. Différents essais ont été faits pour l'étude de la résistance à la fatigue du film comme on peut le constater au niveau du maillage des figures 3.19,3.20 et 3.21 et la figure ci-dessous.

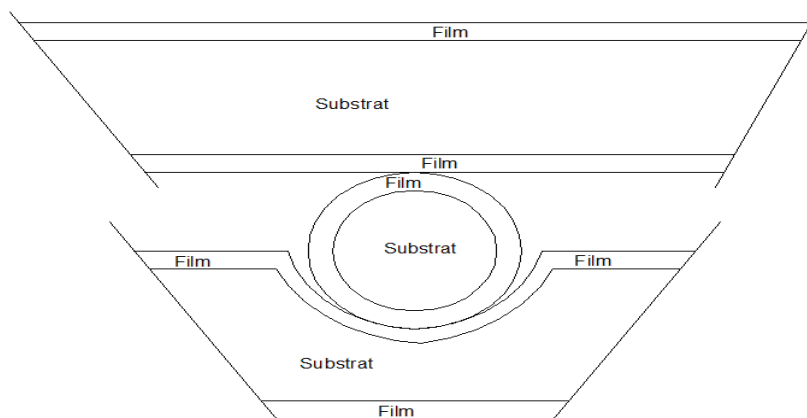


Figure 4.6 : Film et substrat des éléments de l'isolateur après traitement thermomécanique

Utilisant différents type de contact et de sollicitation [69-70] ; les essais de chocs répétés semblent être les plus représentatifs des micro-chocs rencontrés dans des systèmes mécaniques et à l'origine de l'endommagement des composantes : ce sont parmi les essais de fatigue superficielle.

4.9.4. Endommagement du film sous contraintes de traction et de compression

Plusieurs types d'endommagement de film peuvent se produire sous différentes contraintes, les plus courants sous contraintes de traction la figure ci-dessous illustrent l'emplacement et l'étendue de la fissuration. Ceux-ci dépendent des propriétés du film, de l'interface et du substrat de n'importe quel élément de l'isolateur.

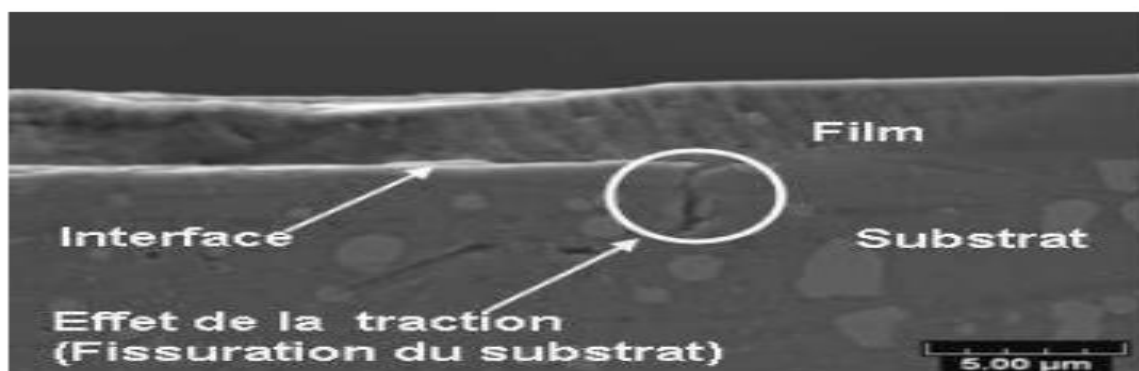


Figure 4.7 : coupe métallographique (microfissuration sur la périphérie de l'acier)

En effet dans la majorité des cas de contraintes de traction dans les films des éléments de l'isolateur conduisent à des fissurations à travers le film qui se produisent avec une périodicité à la surface mais le film comme illustré dans la figure 4.8 de notre modèle présente une très grande dureté et une excellente adhérence avec le substrat, car le film qui s'est produit lors de la trempe est une partie intégrante de l'élément du modèle. C'est le cas le moins probable mais cela n'empêche pas de le considérer comme un cas évident le plus défavorable à prévoir dans l'étude.

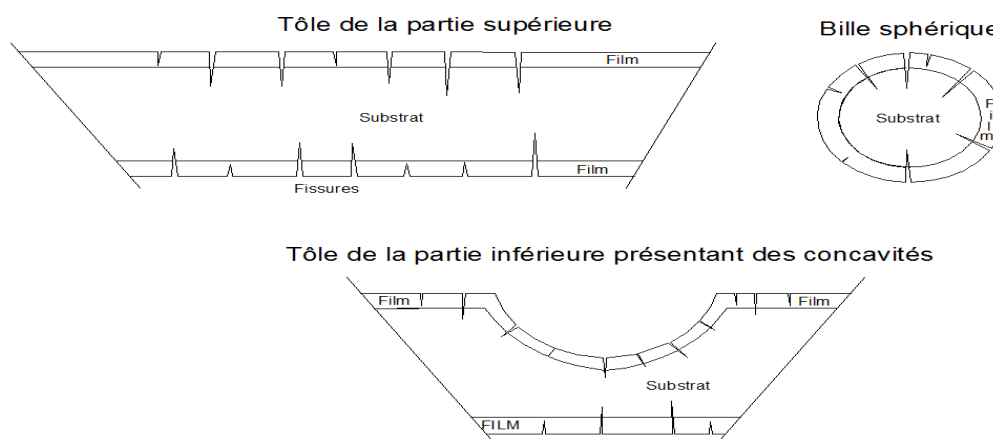


Figure 4.8 : Fissures à prévoir sur film/substrat au niveau de chaque élément de l'isolateur

En utilisant une approche de la mécanique de la rupture dans les conditions purement élastique. Les fissures qui apparaissent se propagent lorsque la contrainte dans le plan dépasse la valeur critique [72]. Car ces mécanismes dépendent fortement des propriétés film/substrat des différents éléments de l'isolateur et de l'interface de chacun d'eux. Mais certains auteurs [73-76] ont constaté que plus les films sont minces, le flambement est le mode d'endommagement le plus courant sous contraintes de compression. L'application de la sollicitation en compression à l'état limite de service peut endommager instantanément les différents films des éléments du modèle d'isolation.

Ce sont des cas d'épaisseurs des films qu'il faudrait étudier et traiter thermo mécaniquement d'une manière minutieuse comment gérer et imposer ces dimensions.

Les mécanismes d'endommagement sous contraintes de compression ne peuvent avoir lieu, à cause de la grande adhérence que l'on peut même qualifier d'intégration au niveau de l'interface entre le film et le substrat ; par contre le flambage et les fissures sont les formes les

plus répandues de l'endommagement des films sous contraintes de compression et de tractions constatées [74-75] et cela lorsque les films s'avèrent très minces.

Si le flambement se produit, il va y avoir un décollement du film à l'interface puis le phénomène de cloquage apparaît au-dessus du décollement et qui peut provoquer à son tour une propagation dans le périmètre de la cloque due à un taux d'énergie restituée.

M.Y. He et Evans [77] ont montré que si le film est très lié au substrat comme indiqué ci-dessus, l'endommagement peut se produire par thermomécanique, causée alors par la plasticité induite dans le substrat comme le montre la figure 4.9 ci-dessous mais il semble encore à partir des résultats de certains de chercheurs que les déformations plastiques du substrat est un paramètre essentiel dans le mécanisme de cloquage des films et susceptible d'être à l'origine de phénomène de cloquage.

4.10 Phénomène de cloquage dans les films

Ce phénomène de cloquage des films a fait l'objet de plusieurs études et recherches[73-78] essentiellement par microscopie optique, microscopie à force atomique, microscopie électronique à balayage et spectroscopie Raman. Ce phénomène se trouve uniquement au niveau des films et surtout au niveau des couches minces ou revêtement de l'élément [79-80]. C'est une énergie élastique emmagasinée dans les épaisseurs des films des éléments qui est facilitée par la propagation des fissures à l'interface film/substrat qui à son tour crée une décohésion qui peut s'agrandir si les contraintes de compression atteignent une valeur critique, un flambement s'impose qui peut être observé sous une forme visible, c'est la création d'une cloque, elle peut modifier les conditions mécaniques du film.

4.11 Forme de cloque

Sous l'action des contraintes, la cloque peut se former sous plusieurs formes: soit de façon circulaire, rectiligne ou de cordon à motif spires jointives qui se propagent par une variation de champ de contraintes et une instabilité de vitesse lors de la propagation.

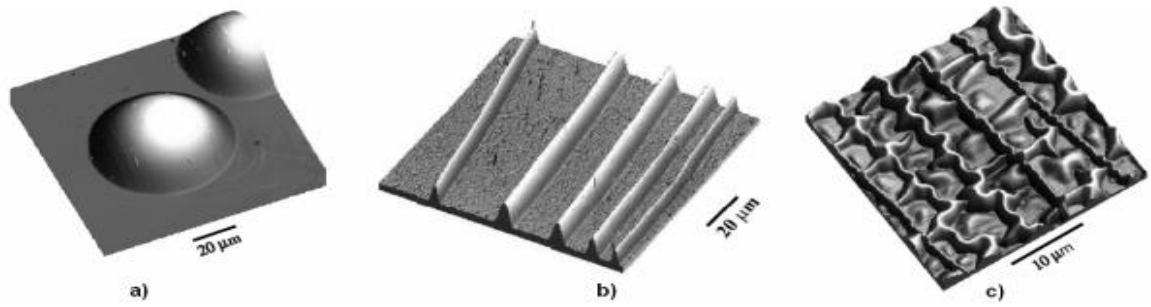


Figure 4.9 : Différentes formes de cloques au niveau de chaque élément de l'isolateur

L'épaisseur du film ne doit pas dépasser une certaine valeur en plus-value ou en moins-value sinon le film amènera une contrainte critique de cloquage plus élevée qui provoquera le risque de propagation.

Quand les conditions mécaniques et physiques seront réunies dans un élément film/substrat pour lequel le substrat s'avère sans aucune déformation, les cloques au niveau du film s'observent comme une sorte de flambement de la couche superficielle qui à leurs tours modifient les conditions mécaniques au niveau du film. L'amorçage de la cloque conduit à un développement possible et une localisation des contraintes de tractions au niveau de l'interface.

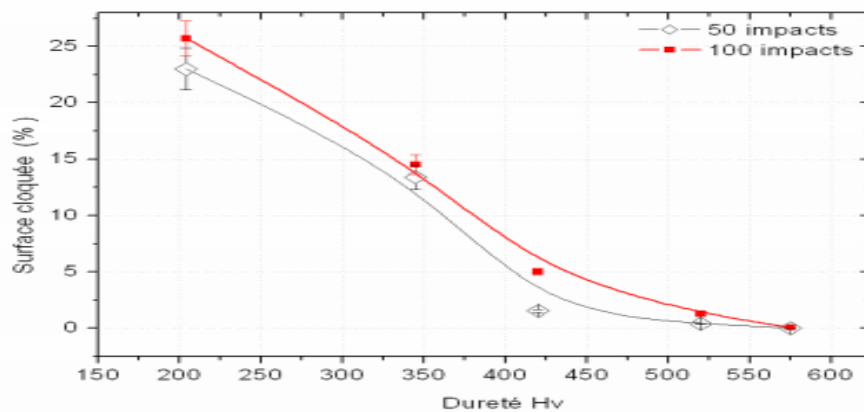


Figure 4.10 : Les cloques diminuent au fur et à mesure de la dureté

Tout cela peut porter un grand préjudice aux éléments modèle car l'effort normal provenant de la structure augmente au fur et à mesure de l'avancement des travaux, la construction peut atteindre sa valeur critique provoquant une augmentation de la zone de décohésion entre film et substrat de tout élément de l'isolateur. A cet effet la dimension du film de chaque élément

de l'isolateur doit être déterminé selon le mécanisme de la trempe et vérifié en conséquence conformément à la courbe de la figure 4.10.

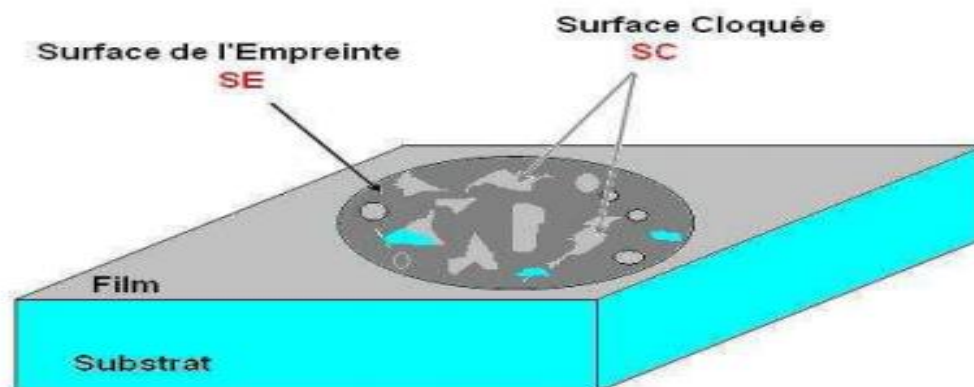


Figure 4.11 : Mesure du pourcentage de la surface cloquée dans l'empreinte

La microscopie acoustique est une technique non destructive, la plus adéquate, très sensible aux déformations. Elle permet de réaliser des analyses qui consistent à sonder la réponse d'un matériau à la sollicitation mécanique produite par une onde acoustique de très haute fréquence [81] presque toutes les informations concernant les propriétés des matériaux, sur le relief et les microfissures de la structure sont tirées suite à ces sollicitations (densité, élasticité, viscosité, porosité,... etc.) [82].

L'idée est de détecter les cloques par le changement de signal qui traverse ces cloques. La fructuosité de ces analyses permet de visualiser la microstructure du substrat figure 4.11 et les défauts de l'interface qui cette dernière permet directement une formation des cloques. Une tendance semble pouvoir être constatée par ces analyses qui confirment que plus la dureté du substrat augmente plus les cloquages au niveau du film diminuent comme le montre la figure 4.10.

Cela dans le but de mieux comprendre les conditions de formation des cloques observées et de pouvoir contrôler leur apparition.

Une dureté critique doit être dégagée par étude et traitement pour que au-delà de laquelle aucune formation de cloquage ne doit avoir lieu ni être constaté dans les limites des conditions d'essais comme la figure ci-dessus. Enfin le cloquage fait son apparition en fonction de la dureté du matériau cette dernière joue un rôle dans la formation des cloques.

La spectroscopie Raman est aussi une technique rapide et aussi non destructive, elle est en mesure de donner des informations sur la structure d'un matériau.

Cette analyse est connue par des chimistes et des géologues, compte tenu de sa résolution et sa facilité de mise en œuvre. Elle possède une résolution spatiale submicronique (environ 0.5um), elle est très sensible aux déformations car elle repose sur l'effet Raman qui résulte de l'interaction entre les photons d'une source lumineuse incidentes et les modes de vibration des molécules du matériau.

4.12 Données techniques sur l'acier 100Cr6

L'acier, acheté à un groupe industriel spécialisé dans les aciers spéciaux (BOHLER), se présente sous la forme de bille de différents diamètres et de tôles de différentes sections et d'épaisseurs.

Il est livré soit à l'état dit trempé d'une dureté dépassant 63HRC. Soit il est livré à l'état dit recuit car cet état permet son utilisation directe à l'usinage.

Ce dernier traitement thermique doit être effectué par le fabricant selon les conditions industrielles suivantes :

- austénitisation de 800 à 850°C ;
- maintien suivant l'épaisseur ;
- refroidissement lent au four.

Ce type de traitement (recuit de coalescence) permet d'obtenir un nombre de dureté ne dépassant pas 20HRC (dureté Rockwel conique).

4.13 Critères de conception du modèle d'isolation

Les différentes parties du modèle doivent ce permettre de la même performance pour toute la durée de vie de structure sous les divers sollicitations à savoir : l'état limite et ultime de service de charge verticale émanant de la structure et de la charge horizontale due au sol.

4.14 Conclusion

Les éléments de toutes les parties du système sont en acier (100Cr6) disponible auprès de différents fabricants. Le nombre, les dimensions et l'emplacement doivent être conformes aux critères de conception.

Le contrôle de la performance des éléments du système dans toutes les conditions de charges possibles verticales ou horizontales doit être assuré par des traitements thermomécaniques et donc de l'état de livraison.

Le traitement thermomécanique de chaque élément de l'isolateur permet d'imposer l'épaisseur du film, de la dimension du substrat et de s'assurer de l'intégration des interfaces au niveau de la microstructure des éléments et d'assurer la même nuance.

CHAPITRE 5

CONCEPTION, CALCUL ET PERFORMANCE DES MODELES DE BATIMENTS AVEC SYSTEME D'ISOLATION A LA BASE

5.1 Introduction

Dans ce qui va suivre avec la validation comme, méthode de calcul , étude analytique et application du modèle d'isolation à la base sur une structure de dix niveaux avec sous-sol comme prévue dans les chapitres qui ont précédé. Ce système permet le découplage du mouvement du sol de la structure et anéantir les forces sismiques qui allaient être transmises à la structure et cela grâce à leur faible rigidité ; la période de l'infrastructure s'allonge, la vitesse d'oscillation diminue et l'accélération s'annule ; c'est-à-dire qu'on isole les structures des composantes horizontales du sol afin d'atteindre la meilleure solution technique et financière.

5.2 Application du modèle

Le modèle étudié sera posé au niveau du sous-sol, au droit de chaque élément porteur de la structure ; c'est-à-dire au niveau de la partie qu'on veut isoler, cela afin de permettre des déplacements importants et présenter une grande rigidité verticale.

5.3 Solution de structure

Les architectes doivent prendre en considération le sous-sol ou le vide-sanitaire en fonction des besoins, ainsi que les conditions suffisantes pour la conception d'un espace pratique permettant l'inspection du système d'isolation c'est à dire l'emplacement de l'isolation sismique doit être accessible pour un besoin éventuel d'entretien, de contrôle, de réparation et de vérification permanente de l'état de toutes les composantes du système régulièrement après chaque événement sismique.

5.4 Configuration de la structure fixée à la base

Nous considérons quatre bâtiments des hauteurs différentes selon les plans de structure. Respecter le même schéma de fondations que celui illustré aux figures 5.1 et 5.2 et adopter un même matériau pour les éléments de structure et le même usage pour une conception conventionnelle.

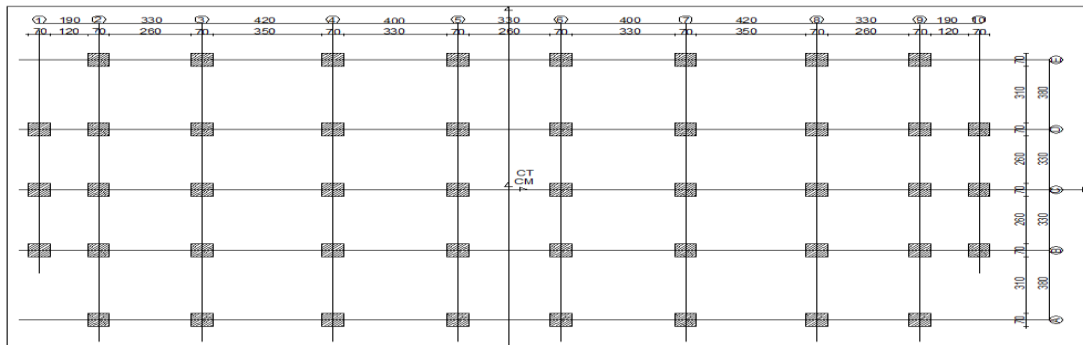


Figure 5.1 : Plan de niveau de structure conventionnelle

Le principe des isolateurs sismiques est de les installer au niveau sous-sol dans un même plan horizontal, qui est la base des structures. Pendant ce temps, l'élément amortisseur doit être installé au même niveau pour aider à limiter l'amplitude du mouvement provoqué par les forces sismiques avec les voiles périphériques de contreventement.

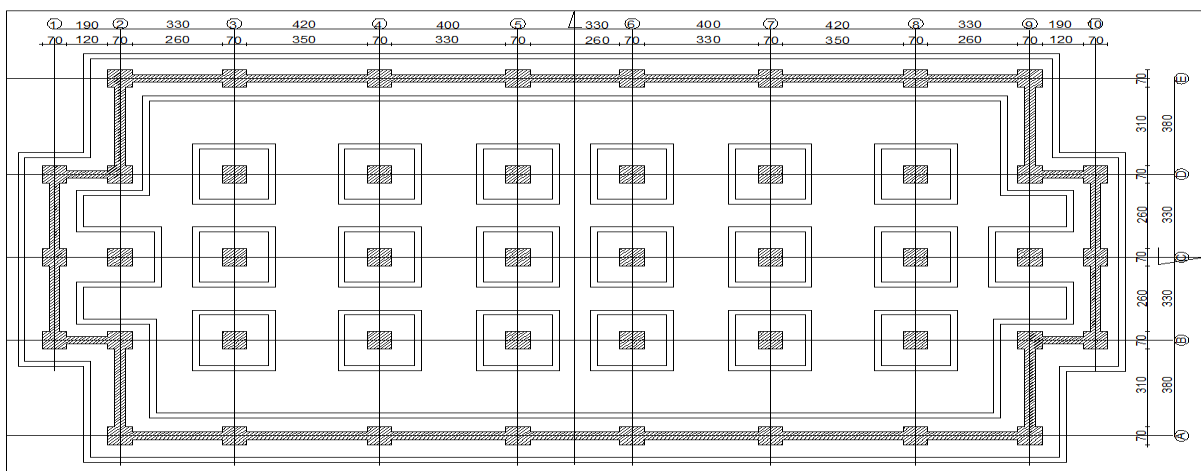


Figure 5.2 : Plan de coffrage de fondation de la structure conventionnelle

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur des différents déplacements horizontaux significatifs illustrés à la figure 5.3 et sur les périodes fondamentales de chaque type de structure avec des déplacements sans isolement à la base en tant que structure fixée avec les différentes zones sismiques comme le montre le Tableau 3.

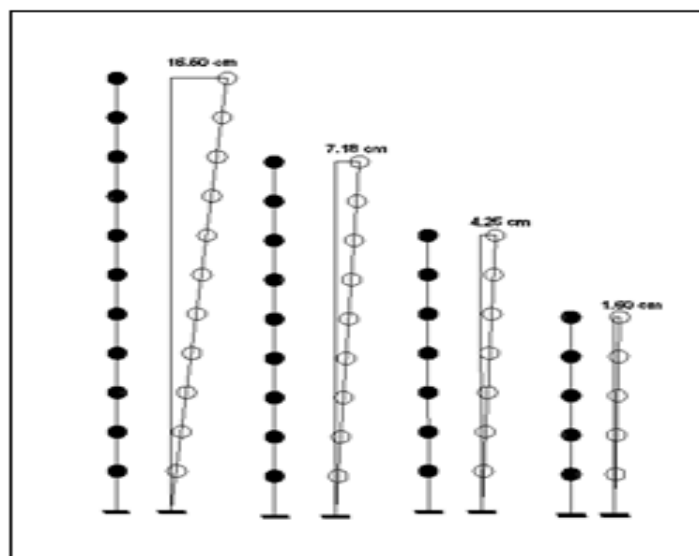


Figure 5.3 : Modélisation de différentes hauteurs de structures fixées avec premier mode de déplacement.

Tenant compte qu'une structure isolée et une structure conventionnelle dimensionnées pour résister à un même séisme auront probablement des rigidités différentes [83], le cas des structures conventionnelles ayant des fréquences plus grandes que celles des structures isolées a été aussi examiné. En effet, d'après Priestley [84], on peut supposer que la rigidité effective est proportionnelle à la résistance. Néanmoins, afin de simplifier la présentation des résultats. Les comportements des appuis et de la structure sont modélisés avec des modèles idéalisés simples.

L'objectif est de mieux cerner le comportement de ce type de structures et en s'appuyant sur des principes physiques de base afin que les dispositifs d'isolation de technologie soient spécifiques. C'est pourquoi les modèles utilisés sont simples, mais capables de reproduire les phénomènes physiques essentiels d'intérêt.

5.5 Etude analytique et Solution

Considérons un système à plusieurs niveaux dont l'équation du mouvement ou l'indice 3 des différentes composantes peut être considéré comme une structure à plusieurs niveaux. Le principe de l'étude analytique est de considérer que l'équation du mouvement devient en présence de l'amortissement comme illustré dans la figure 5.4.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

$$\ddot{x} + \frac{c}{M}\dot{x} + \frac{K}{M}x = -\ddot{x}_g \quad (2)$$

$$\ddot{x} + 2\omega\xi\dot{x} + \omega x = -\ddot{x}_g \quad (3)$$

Où x_1 , x_2 et x_3 sont des déplacements latéraux de l'infrastructure, de l'isolateur et de la superstructure relative. \ddot{x}_g est l'accélération du sol. Le principe de base de notre recherche suppose que x_3 est considéré nul car la superstructure est supposée fixe sans déplacement.

Les masses comme m_1 , m_2 et m_3 sont les masses respectives de l'infrastructure, du système d'isolation et d'une superstructure (plusieurs niveaux) de même pour les rigidités et les coefficients d'amortissements. Autres dispositifs d'isolations à base d'élastomères considèrent un léger déplacement de la superstructure qui est x_3

Les indices 2 et 3 représentent l'isolation et la superstructure comme indiqué sur la figure 5.4 $K_1 = \omega^2(m_1 + m_2 + m_3)$; $K_2 = \omega^2(m_2 + m_3)$ et $K_3 = \omega^2 m_3$ sont définies comme des fréquences nominales de l'infrastructure, de l'isolateur et de la superstructure.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\ddot{x} + 2\omega\xi\dot{x} + \omega x^2 = -\ddot{x}_g \quad (7)$$

$$x(t) = Ge^{st} \quad (8)$$

$$x(t) = Ge^{st}(ms^2 + cs + k) = -\ddot{x}g \quad (9)$$

$$(ms^2 + cs + k) = 0 \quad (10)$$

$$s = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2} \quad (11)$$

Trois types de mouvements sont présents dans cette équation (figure 5.4), le seul cas intéressant pour l'analyse du comportement des structures c'est l'amortissement lié au génie-civil.

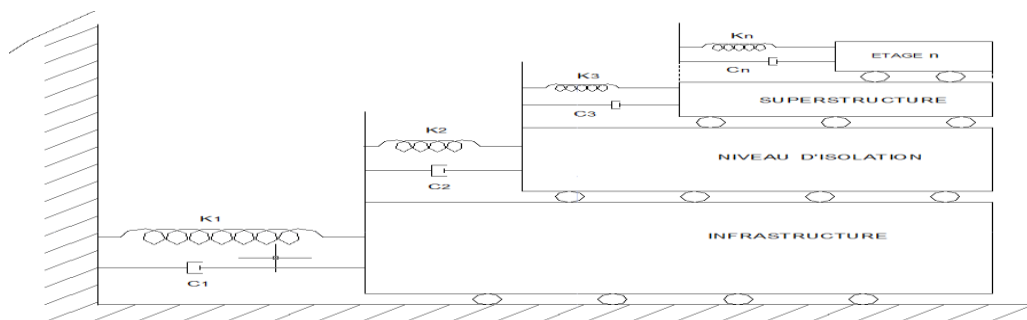


Figure 5.4 : Modèle mathématique d'une structure à plusieurs niveaux sur appuis isolés.

$$\ddot{x} + 2\omega \xi \dot{x} + \omega x^2 = -\ddot{x}g \quad (12)$$

Et celle-ci ayant toujours un amortissement inférieur à l'amortissement critique $C = \xi C_{Cr}$. L'importance de l'amortissement c'est qu'il s'oppose à la masse d'effectuer une série d'oscillations d'amplitude qui permet la décroissance des oscillations exponentiellement de part et d'autres de la position neutre, tendant asymptotiquement vers l'axe des abscisses. Cette décroissance est due, à l'existence des amortisseurs qui sont des voiles périphériques et de certains voiles à l'intérieur de l'infrastructure qui agissent comme des amortisseurs naturels par leurs grandes rigidités, additionnés à des amortisseurs visqueux comme matériels placés au niveau des socles là où sont localisés les isolateurs.

Cet ensemble d'amortisseurs imposent la décroissance de la sinusoïde qui représente la réponse de l'infrastructure au chargement sismique.

En conclusion : les caractéristiques réelles d'amortissement des structures sont délicates et encore non évidentes à déterminer. Dans le calcul des structures on utilise d'une part presque toujours l'amortissement visqueux à cause de son élégance mathématique, par un calcul de décrément logarithmique qui est le taux de décroissance des amplitudes du mouvement

d'une autre part, généralement une méthode pratique expérimentale des vibrations amorties, pour estimer le facteur d'amortissement consistant à compter le nombre de cycle nécessaire qui affiche une petite amplitude en aval comme au pic que l'on estime faible, par contre en amont il y a le premier pic qui représente la plus grande amplitude, il sert de référence pour la conception et la confirmation des dimensions des tôles supérieure et inférieure.

Il existe des règles approchées pour les différents facteurs d'amortissement ne dépassant pas les 20%. Il est à rappeler par exemple, que pour un rapport d'amortissement de 10% on peut obtenir une amplitude de retour réduite de moitié en un cycle.

La structure la plus élancé atteint selon un mouvement de sol une longue période et une grande amplitude illustrée à la figure 5.6 par un chargement sismique ou par des essais à la table vibrante qui enregistrent le premier pic ; c'est-à-dire le premier déplacement ; en d'autres termes la plus grande amplitude ; ce qui offre une flexibilité correspondante à la direction horizontale et un effort normal permanent propre à la structure. La structure à dix niveaux pour chaque colonne. En l'absence des essais nous avons estimé plus de 80 roulements (billes sphériques de cinq cm de diamètre (comme illustré dans la figure 5.8) divisés par 2220 KN Tableau 5.1 pour déterminer 26,5KN en tant que charge verticale supportée par une bille. On peut appliquer le même principe de calcul pour les différentes autres structures.

Tableau 5.1 Charges et déplacement des différentes structures selon les zones

Algerian Seismic Zones					
Zone II A				Zone II B	
Structure	Ultime effort (KN)	Depl X-X (cm)	Depl Y-Y (cm)	Depl X-X (cm)	Depl Y-Y (cm)
RDC+10 stories	2220	8.52	11.63	14.92	16.50
RDC+08 stories	1695	3.82	5.60	6.78	7.18
RDC+06 stories	1315	1.35	1.98	3.17	4.25
RDC+04 stories	907	0.7	0.6	1.21	1.60

Selon les différentes périodes de chaque structure, à la suite de la conception de la structure fixe, les mêmes matériaux sont adoptés. La conception et la dimension du système d'isolation sont liées au mode fondamental d'analyse linéaire du système. A des fins de comparaison, un modèle à 1 DDL de la structure conventionnelle non isolée dont la masse, la rigidité et l'amortissement sont les mêmes que celles de la structure isolée.

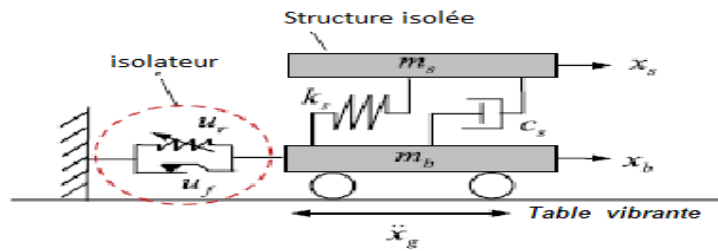


Figure 5.5 : Modèle mathématique d'un portique sur appui isolé

Une structure isolée en réalité est un système de plusieurs degrés de liberté (DDL). Une approximation de leur réponse peut être obtenue par un modèle simplifié à deux degrés de liberté.

M_b et K_b sont la somme de la masse de la base d'isolation et respectivement la rigidité etc figure 5.5. L'amortissement de l'appui à la base. m_s représente la masse effective du premier mode de la superstructure fixée, K_s et C_s sont sa rigidité et son amortissement

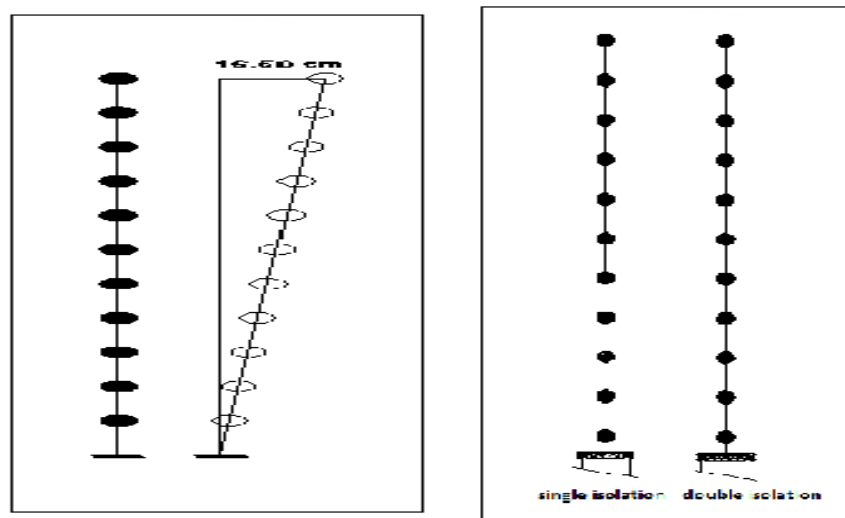


Figure 5.6 : Premier mode de déplacement d'une structure fixée et isolée

L'idée principale et l'objectif ultime est qu'un système d'isolation pratique est capable d'absorber ou de filtrer toutes les fréquences. Les isolateurs sont rigides dans la direction verticale et la transmissibilité doit être efficace, automatiquement le comportement non linéaire est limité au niveau du système d'isolation. Parmi les quatre bâtiments différents, le bâtiment à dix niveaux sur sous-sol présenté dans la figure 5.6 a été

sélectionné dans cette étude avec un déplacement maximum impliquant le mode fondamental. Le même principe de calcul peut être adopté aux différentes structures.

5.6 Configuration et application pratique de la base isolée

Nous considérons le sous-sol avec deux mètres de hauteur, où les isolateurs ont été placés au sommet de chaque socle, comme le montre la figure 5.9. La structure est contreventée par des voiles périphériques en béton armé tout autour des fondations, voir la figure 5.7 et de même à l'intérieur du sous-sol et entre certains socles placés à égales distances par rapport à l'axe de symétrie de la structure. Cette technique donne une source utile comme premier amortissement naturel par leur grande inertie à la base de la structure. Ce système de contreventement doit s'arrêter uniquement au niveau du sous sol, il en est de même aussi des autres structures à étages.

Il est clair que les dimensions des socles sont déterminés en fonction du nombre de billes et sont situés au sous-sol comme éléments intégrés aux fondations et que la superstructure doit demeurer immobile en préservant sa fonctionnalité après chaque charge horizontale. La structure conçue conformément au plan de structure fixée aux fondations, modélisée à la figure 5.7 et d'une structure isolée, modélisée à la figure 5.9.

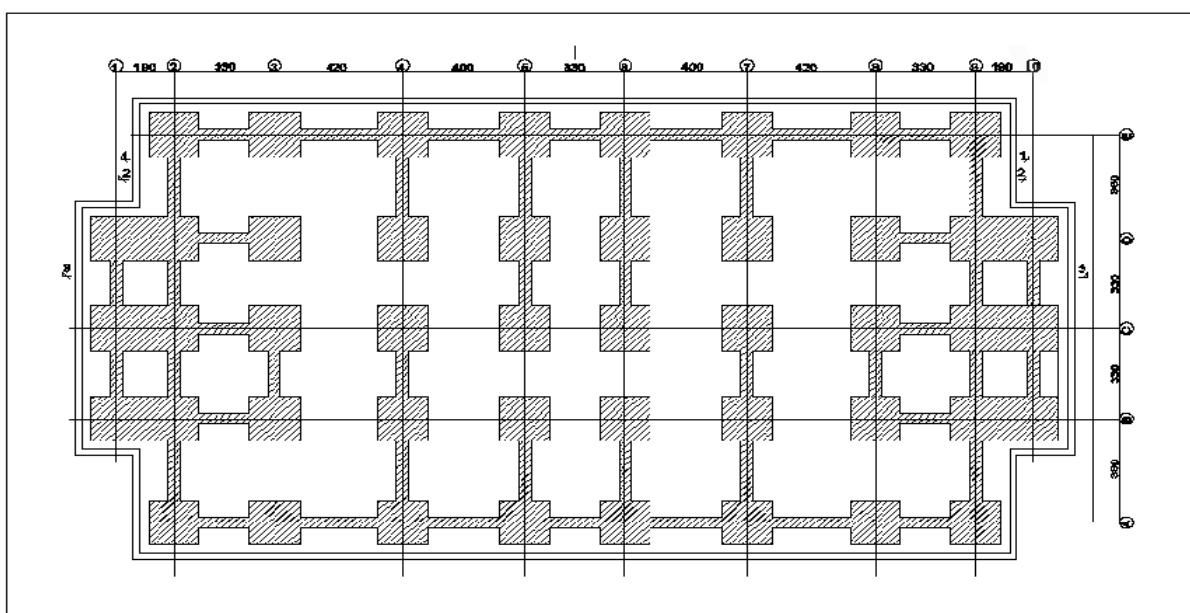


Figure 5.7 : Plan de coffrage de fondation pour une structure isolée

Au niveau de l'emplacement du système d'isolation, un accès facile doit être prévu pour inspecter, contrôler et remplacer si nécessaire les pièces défectueuses de l'isolateur, en fonction du type de configuration indiqué aux figures 7.8-7.9.

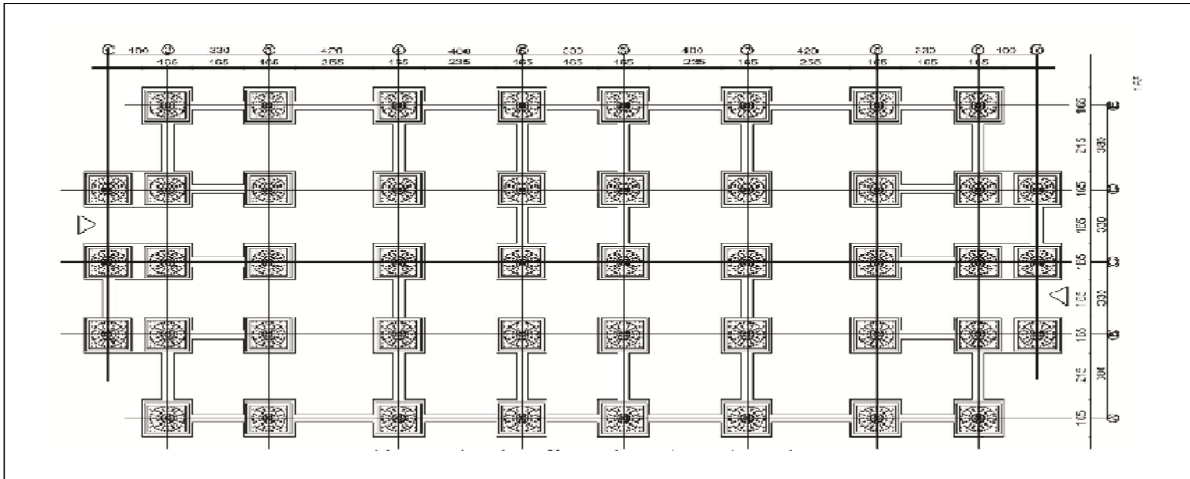


Figure 5.8: Position du système d'isolation au niveau des socles des fondations

Interposées entre la base de la structure et la fondation figure 5.8, les billes sphériques sont dures et rigides sous la charge verticale et peuvent pivoter sur elles-mêmes sous l'effet des efforts latéraux à l'intérieur des concavités de la tôle inférieure à l'aide de lubrifiant.

Le mouvement des billes permettent de capter complètement les déformations et les accélérations de l'infrastructure de sorte que la superstructure isolée ne subit aucun mouvement. En revanche, l'augmentation de la période au niveau de l'infrastructure engendre des déplacements plus importants mais sont concentrées totalement au niveau de l'isolateur.

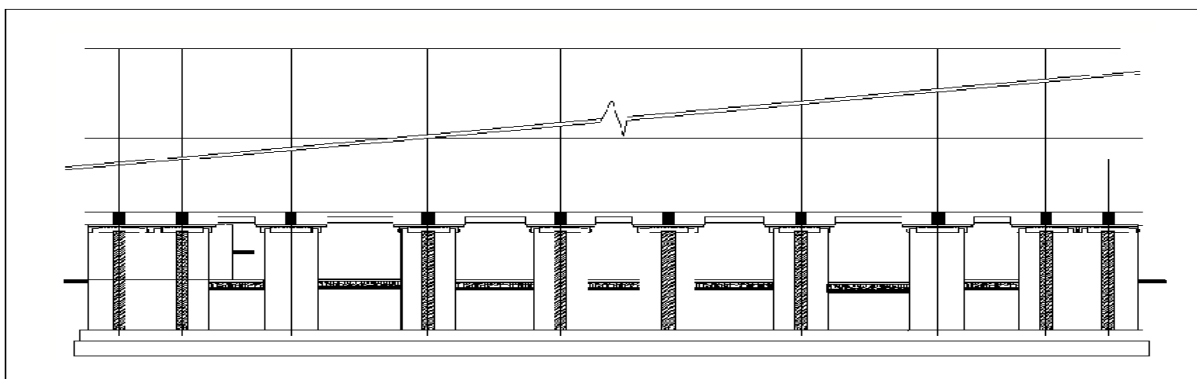


Figure 7.9 : Coupe longitudinale au niveau des socles de fondation

Les systèmes de contreventements propres à la structure et les amortisseurs comme dispositifs au niveau des modèles ont pour rôles de réduire et de limiter l'amplitude du mouvement des fondations.

La réponse de la structure est principalement fonction des caractéristiques et du type du système d'isolation. L'application d'un tel système d'isolation peut confirmer que la torsion au niveaux des étages ne pourra avoir lieu même s'il y a une mauvaise répartition des éléments rigides (porteurs /portés) de la superstructure, elle est réduite à néant, en quelque sorte comme si le centre de masse et le centre de torsion chevauchent entre eux, explicitement les déplacements de la structure et les mouvements relatifs des étages sont nuls.

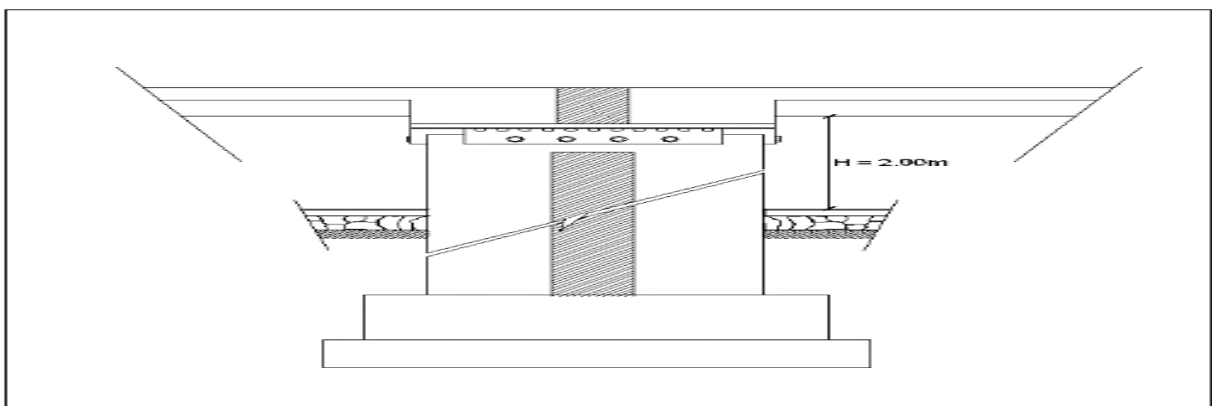


Figure 5.10 : Coupe longitudinale du voile de contreventement au niveau du socle

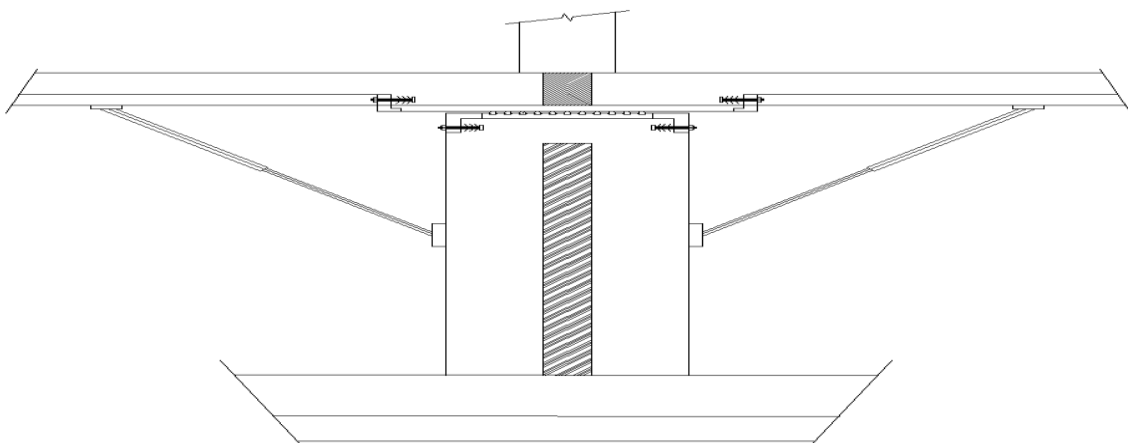


Figure 5.11 : Position, de l'isolateur au niveau du socle (vide sanitaire) et amortisseurs

Le voile périphérique de contreventement fixés aux socles au niveau du sous-sol en tant qu'amortisseur naturel par sa grande rigidité et les amortisseurs en tant que dispositifs

supplémentaires fixés entre les socles et le plancher haut du sous-sol peuvent servir d'absorbeurs d'énergie pour réduire les excitations du sol à la base comme le montrent les figures 5.11 et 5.12.



Figure 5.12 : type de Système d'amortissement le plus utilisé

5.7 Détails du concept du système d'isolation

Dans les figures actuelles, les configurations présentées à la figure 5.11, à savoir la fixation de la tôle supérieure en acier à la dernière dalle de la superstructure, sont conçues pour indiquer l'emplacement des autres différentes parties de l'isolateur au niveau du socle, comme indiqué aux figures 5.13-5.16. La plaque d'acier supérieure constituera l'espace de glissement du système d'isolation comme zone de déplacement latéral des fondations. C'est dans cet espace ou se dissipe complètement l'énergie sismique captée par l'infrastructure.

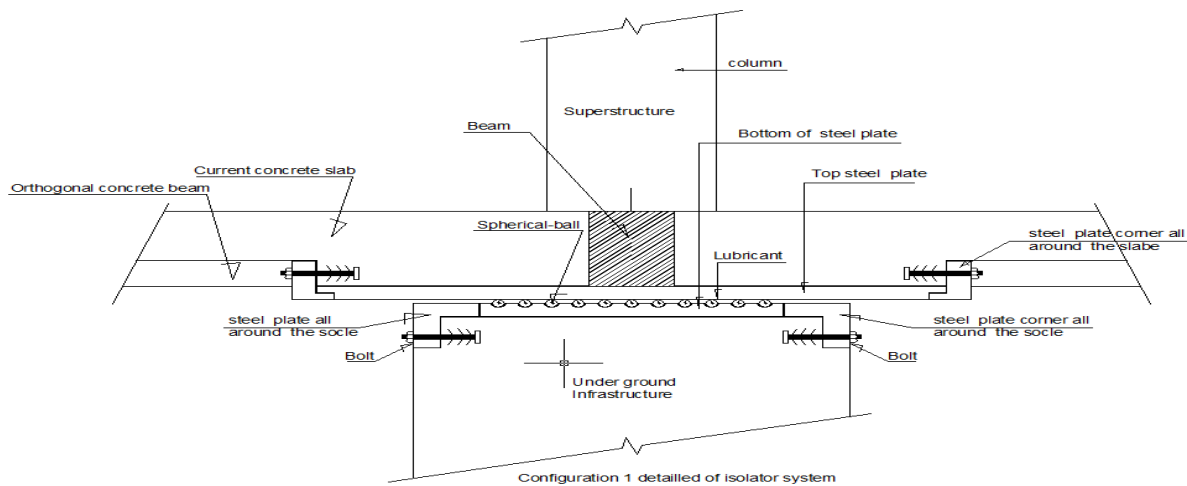


Figure 5.13 : Configuration détaillée du système d'isolation

Ce détail permet de traiter tout type de structure, d'améliorer la régularité des structures non régulières, de voir comment anéantir l'accélération du seisme et de limiter l'amplitude des déplacements qui tends à croitre avec souplesse selon les conditions environnantes de la structure.

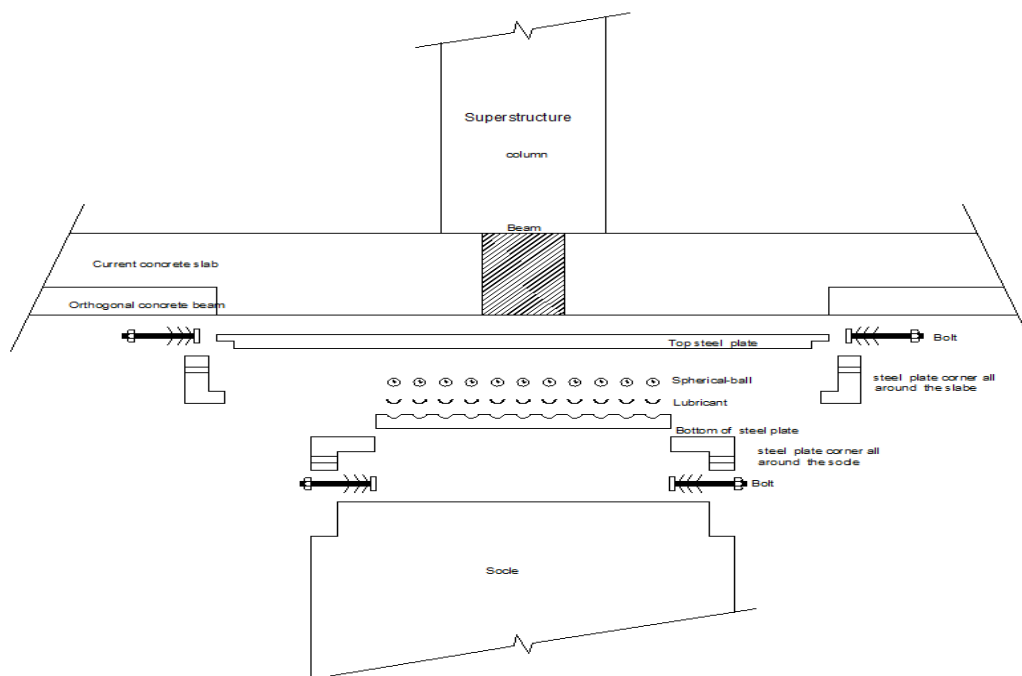


Figure 5.14 : Détail de chaque élément de l'isolateur

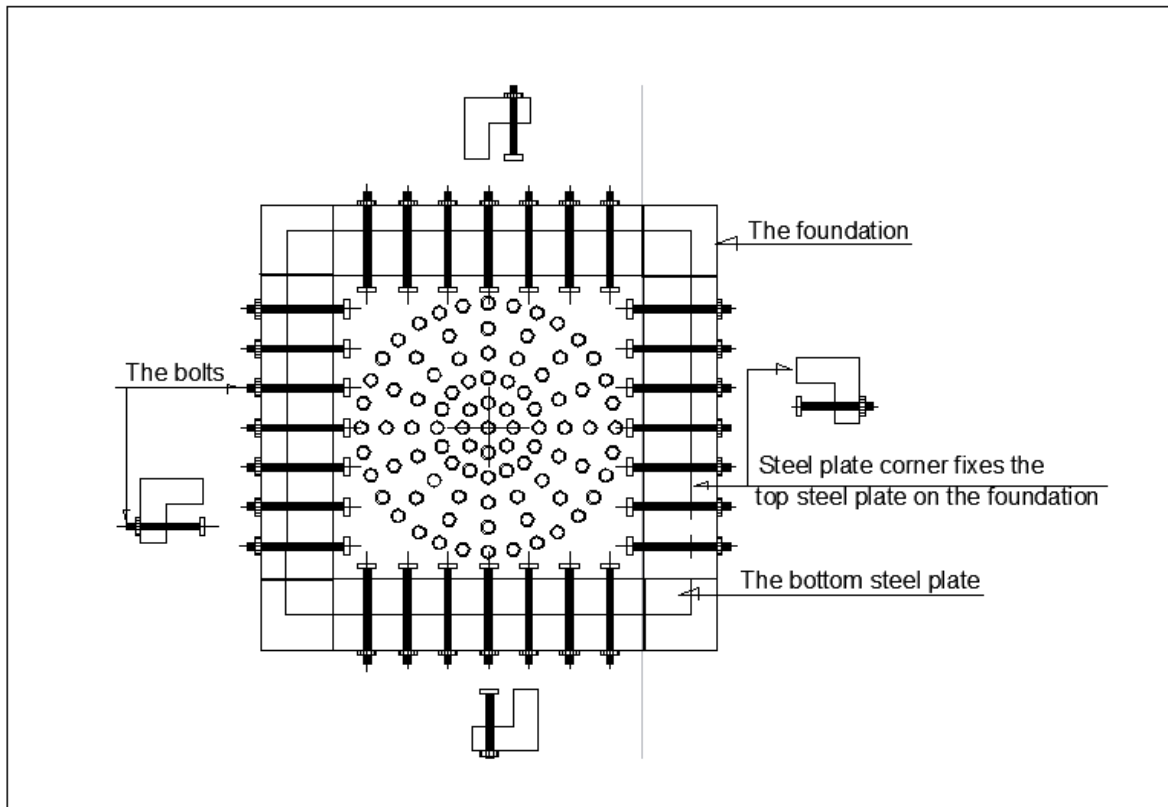


Figure 5.15 : Vue d'en haut de la plaque inférieure présentant des formes concaves avec le système de fixation

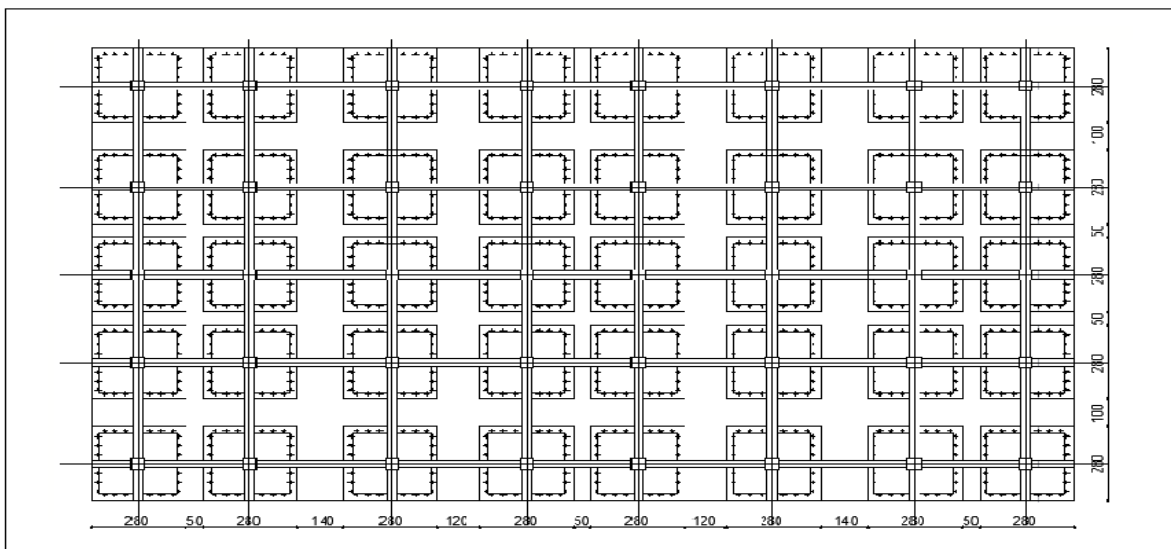


Figure 5.16 : Plaque supérieure fixée au droit de chaque poteau au niveau du plancher haut du vide sanitaire

Tous ces types d'isolations dépendent du comportement de la structure de la figure 5.16. Ils ne doivent transmettre aucun effort qui permet le déplacement à la superstructure même résiduelle qu'il soit dû à la charge horizontale, et cela afin de ne pas opter à un double système d'isolation comme indiqué à la figure 5.6.

5.8 Conclusion

La réduction recherchée des accélérations n'est réalisée que dans le mode fondamental d'oscillation, par contre les modes supérieurs du mouvement global sont en général faibles ; elles sont à craindre que si la superstructure est très flexible.

L'application de certaines théories a déterminé les zones les plus sollicitées et a permis l'adoption du matériau qui possède les propriétés d'élasticité, de poisson, de rupture ou de fatigue les mieux adaptés. Il est important de pouvoir prévoir des déformations permanentes ou endommagements dans les régions de contact générées par des répartitions spécifiques des contraintes dues aux efforts surfaciques.

Les éléments de l'isolateur doivent rester dans leur résilience durant la vie de l'ouvrage et doivent être repris en cas de pérennité d'un des éléments ou qu'on juge défectueux.

Les systèmes de contreventements propres à la structure et les amortisseurs comme dispositifs au niveau des modèles ont pour rôles de réduire l'amplitude du mouvement des fondations.

Les billes, les interfaces d'usure de glissement au niveau des concavités de la tôle inférieure et le lubrifiant sont les caractéristiques clés qui contrôlent la période et la quantité d'énergie dissipée du système.

CONCLUSION GENERALE

Une méthodologie décrivant l'utilisation de deux ou plusieurs approches analytiques pour la conception de systèmes d'isolation de toutes les structures est très importante en raison de la précision, de la convergence des résultats que nous avons recherchés parmi les différentes approches, en particulier les propriétés mécaniques des matériaux du système utilisé, des déformations, durabilité et vulnérabilité en raison de différentes charges appliquées.

Les différentes parties du système d'isolation doivent représenter la rigidité du matériau dans sa phase d'élastique, toutes les déformations des différentes parties de l'isolateur doivent être entièrement prises en charge après le chargement horizontal par certaines propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité élevé du film et du substrat des éléments et le coefficient de Poisson.

Aucun léger ou négligeable frottement ne permet vraiment d'atteindre la vraie période naturelle ainsi que de modérer une grande amplitude du sous-sol. Ceci a conduit l'étude à confirmer la haute performance de l'isolation sismique en permettant aux architectes d'innover dans leur conception sans aucune limitation ou gêne par les codes de génie civil tel que :

- formes, fonctionnement, trame, irrégularité en plan et conception architecturale ;
- fonctionnalité de la conception génie-civil (centre de masse et centre de rigidité) ;
- élancement des bâtiments etc.

Une des conditions premières du système isolé est de s'assurer que la zone de contact est parfaitement lisse et que les matériaux des trois éléments du système sont isotropes et homogènes car en pratique généralement sous l'effet de charge verticale au plan tangent commun entre les éléments, se crée une surface de contact.

L'application de certaines théories a déterminé les zones les plus sollicitées et a permis l'adoption du matériau qui possède les propriétés d'élasticité, de poisson, de rupture ou de fatigue les mieux adaptés. Il est important de pouvoir prévoir des déformations permanentes ou endommagements dans les régions de contact générés par des répartitions spécifiques des contraintes due aux efforts surfaciques.

Le nombre de billes sphériques, l'épaisseur de l'acier des tôles supérieures et inférieures dépend du type de structure. En outre, les billes sphériques utilisées doivent assurer une meilleure stabilité, garantissant la sécurité et la linéarité du système d'isolation envers les

chargements de séisme en séisme. Lorsque les frottements sont très faibles, les billes sphériques lubrifiées aident à réduire le coefficient de frottement élevé à chaque point de contact par glissement. Car la fonction d'un lubrifiant est de favoriser par graissage le glissement de deux éléments au niveau de leurs interfaces.

D'une manière générale les lubrifiants réduisent les frottements et l'usure, évacuent les impuretés (poussières, débris d'usure,...) protègent les éléments de l'isolateur contre la corrosion, participent à l'étanchéité, peuvent avoir une fonction nettoyante (détergente) et évitent le grippage. Chacune de ces fonctions peut être plus ou moins développée selon l'application.

L'isolateur peut être soumis à diverses forces d'excitation jusqu'à l'obtention d'un comportement non linéaire par rapport à la superstructure, les performances augmentent en fonction de la capacité de dissipation d'énergie, de la phase de ductilité et des propriétés de fatigue de matériau de chaque élément.

Le système d'isolation est devenu une alternative attrayante pour tous les types de bâtiments ; il doit conserver la même forme après de nombreuses secousses répétées du sol et ignorer la torsion d'ensemble due à l'asymétrie de la forme du bâtiment et de son fonctionnement par la non linéarité ou la non transmissibilité de l'effort à la structure due au système.

Tout ceci pour comprendre la charge axiale optimale, le comportement sismique, le type de sol où la structure est fixée, comment analyser la conception du type d'isolation sismique et le système le plus performant et efficace pour renforcer la protection sismique.

Ce document présente une nouvelle conception innovante, défendue par différentes approches, dans la mesure où elle applique le principe de la convergence des résultats pour accroître la sécurité des structures.

Cette stratégie de conception fournit un modèle économique et pratique pour la nouvelle conception de différentes structures de bâtiments et la réhabilitation sismique des bâtiments stratégiques existants, ainsi que pour permettre des innovations dans les conceptions architecturales avec une performance sismique solide.

La faisabilité du système d'isolation, l'applicabilité des différentes approches d'analyse nécessitent un test à la table vibrante afin d'obtenir et de confirmer les résultats pour l'assurance et la réassurance de la conception d'un modèle adéquat.

Certains type d'appareils en élastomère et autres acceptés, permettent de limiter le grand déplacement de l'infrastructure, mais tolèrent de faibles déplacements constants du bas vers le haut à la structure, ce qui peut être une source de degré de linéarité de la structure.

Cela ne peut signifier que le système est totalement isolé, mais n'empêche qu'il y a une légère transmission de la force horizontale à la structure, qui par conséquent peut porter préjudice à la structure et générer de petites oscillations accompagnées d'une rotation surtout pour les structures qui présentent une certaine irrégularité en plan même en étant isolée.

La rigueur scientifique est guidée par la notion d'objectivité qui est la recherche d'une construction de modèle d'isolation technique et d'arriver à un objectif concret de recherche.

Nous nous sommes fixés plusieurs objectifs quant au modèle d'isolation de notre recherche

L'objectif scientifique, l'objectif technologique et l'objectif économique.

L'objectif scientifique :

- la pose des assises théoriques permettent la maîtrise des technologies comment assurer l'isolation des ouvrages de génie civil des accélérations dues aux forces sismiques ;
- maîtrise et comparaison entre les différentes techniques d'isolation sismique ;
- réalisation des simulations numériques pour les systèmes proposés ;
- proposition des méthodes de calculs qui feront l'objet d'un éventuel règlement en conséquence.

L'objectif technologique :

Propositions pour un ouvrage, un ou plusieurs types de systèmes de dissipation d'énergie sismique adéquat afin de permettre et de justifier une éventuelle politique de fabrication d'un tel dispositif.

L'objectif économique :

- comparative d'un ouvrage avec et sans système de dissipation d'énergie tout en en appliquant la réglementation parasismique Algérienne en vigueur, ce qui va permettre un calcul de métré différent et cela pourra confirmer un gain en béton armé dans le sens le plus large car les éléments porteurs ne travaillent qu'à la compression.
- création de nouveaux postes de travail suite à une politique de mise en place de dispositifs de dissipation d'énergie sismique dans les projets de construction ;
- amélioration du savoir-faire des dispositifs et spécialisation des bâtisseurs par l'introduction de nouvelle technologie.

RECOMMANDATIONS

Tous les systèmes d'isolations sismiques conviennent à toutes les structures si les différentes conditions seront réunies :

Tout concepteur de système d'isolation sismique doit se référer au spectre d'accélération moyenne pour différents sols. Car en aucun cas les tassements différentiels ne sont acceptés tolérés ni admis.

Tout concepteur de système d'isolation sismique doit disposer d'une coupe lithologique du sol pour connaître les épaisseurs des différentes couches de sols pour pouvoir poser les fondations sur la même couche.

Les structures doivent être larges à leurs bases et posées sur des semelles filantes, croisées ou sur un radier général.

Tout concepteur d'isolation sismique doit au préalable, déterminer la période fondamentale du premier mode et son déplacement maximum au sommet de la structure non isolée et l'effort normal de la structure.

Les dimensions des socles ou sont posés les éléments des isolateurs et leurs dimensions seront déterminés en fonction de la période et du déplacement comme calcul préliminaire déterminée par le spectre de la structure isolée.

Les épaisseurs des tôles, le nombre et le diamètre de billes des éléments du modèle doivent être dimensionnés en fonction de l'effort normal de la structure conformément au tracé de la courbe.

Les éléments du modèle doivent faire l'objet d'un traitement thermomécanique afin d'imposer, la résistance, l'épaisseur du film et le substrat des différents éléments de l'isolateur par comparaison avec la contrainte due à l'effort normal.

Le sous-sol doit être accessible, disposer de pieds droits et niche à vérins en permanence, de toutes pièces d'éléments du modèle en permanence, dépourvues d'impuretés et bien emballés.

Les systèmes d'isolations doivent être très bien enveloppés et à l'abri de des courants d'air ou de ventilation afin d'éviter le dessèchement des lubrifiants.

Les lubrifiants doivent avoir une longue durée de vie, de grande viscosité et de densité élevée. L'accès et le contrôle des systèmes d'isolation doit se faire en permanence et juste après séismes.

Les recommandations ne se limitent pas et ces mesures doivent être coercitives dans les prises en considérations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Mian Zacec. Construction Parasismique. Risque sismique, Conception Parasismique des bâtiments, Réglementation. Editions Parentheses. 72, cours Julier-13006 Marseille- France.
- [2] Kobori, T. (Active Seismic Response Control), in Proceeding of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, August 2-9 1988, ppVII 435-446.
- [3] R.W.CLOUGH, J. PENZIEN. Dynamique des structures Tome 1. Principes Fondamentaux. Université de Californie à Berkeley. Editions Pluralis.
- [4] Kelly, J.M., The influence of base isolation on the seismic response of light secondary equipment, in Report to Electric Power Research Institute EPRI NP-2919. 1983.]SeismoStruct. SeismoStruct help file : (<http://www.seismosoft.com>).
- [5] Hall, J., *Discussion. The role of damping in seismic isolation.* Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999. 28 : p. 1717-1720
- [6] André. PLUMIER. Constructions en Zone Sismique. Faculté des Sciences Appliquées. Département d'Architecture, Géologie, Environnement et Constructions Edition 2007.
- [7] J. M. Kelly, Most recent Development on isolation of civil buildings. Proc. IntPostSmartConf Seminar on isolation, Energy dissipation and control of vibrations of structures. Capri, Italy, 1993.
- [8] P.W. Clark, I. D. Aiken, J. M. Kelly, Ongoing studies of the foothill law and justice center. In: Proceedings from the 15th structures congress, 1997.
- [9] F. Naeim, J. M. Kelly, Design of seismic isolated structures. From theory to practice. John Wiley, (1999) doi: 10.1002/9780470172742
- [10] J. M. Kelly, Earthquake Resistant Design with Rubber. Berlin Springer, 1997.
- [11] R. I. Skinner, W. H. Robinson, G. H. Mc-Verry, An Introduction to seismic isolation. Wellington DSIR Physical Science, 1993.
- [12] A. R. Bhuiyan, Rheology modeling of laminated rubber bearing. PhD Thesis Saitama University, Japan, 2009.
- [13] J. A. C. A. Calantariants, Improvements in and Connected with building and other works and appurtenances to Resist the Action of Earthquake and the Like. Engineering Library, Stanford University, 1909.
- [14] D. E. Montalk, R. W. Shock, Absorbing or Minimising Means for building. U.S Patent, 1932.
- [15] J. Bechtold, Earthquake Proof Building. U.S Patent, 1907.

- [16] N. B. Green, Flexible First Story Construction for Earthquake Resistance. Trans Amer. Soc. Civil Eng, 1935.
- [17] J. M. Kelly, Aseismic Base Isolation: Its History and Prospect, Joint Sealing and Bearing System for Concrete Structures. Publication SP-70, American Concrete Institute, 1982
- [18] I.G. Buckle, R. L. Mayes, Seismic Isolation: History, Application and Performance-A World View. Earthquake Spectra Journal. 6 (2) (1990) 161-201. doi:[10.1193/1.1585564](https://doi.org/10.1193/1.1585564)
- [19] F. Naeim, J. M. Kelly, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. John Wiley and Sons, New York, 1999.
- [20] SeismoStruct. SeismoStruct help file : (<http://www.seismosoft.com>).
- [21] A. Ghobarah, H.M. Ali, Seismic design of base-isolated highway bridges utilizing lead-rubber-bearing. Can.J.Civ. Eng.17 (3) (1990) 413-32. doi:[10.1139/190-045](https://doi.org/10.1139/190-045)
- [22] G. P. Warn, A. S. Whittaker, Performances Estimates in Seismically Isolated bridges. Eng Struct.26 (2004) 1261-78. doi: [10.1016/j.engstruct.2004.04.006](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.04.006)
- [23] A. R. Bhuiyan, Y. Okui, H. Mitamura, T. Imai, A rheology model of high damping rubber, Bearing for seismic analysis: identification of nonlinear viscosity Solid Struct. Int. J.Solids and Structures. 46 (7) (2009) 1778-1792. doi:[10.1016/j.ijsolstr.2009.01.005](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.01.005)
- [24] M. S. Alam, M. A. R. Bhuiyan, A. H. M. Muntasir Billah, Seismic fragility assessment of SMA-bar restrained multi-span continuous highway bridge isolated by different laminated rubber bearings in medium to strong seismic risk zones. Bull. Earthq. Eng. 10 (6) (2012) 1885-1909. doi: [10.1007/s10518-012-9389-0](https://doi.org/10.1007/s10518-012-9389-0)
- [25] M. A. R. Bhuiyan, M. S. Alam, Seismic vulnerability assessment of a multi-span continuous highway bridge fitted with shape memory alloy bars and laminated rubber bearings. Earthq. Spectra. 28 (4) (2012) 396-407. doi: [10.1193/1.4000089](https://doi.org/10.1193/1.4000089)
- [26] B. Y. Moon, G. J. Kang, B. S. Kang, J. M. Kelly, Design and manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation. J. Master. Process. Technol. 130 (131) (2002) 145-50. doi: [10.1016/s0924-0136\(02\)00713-6](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00713-6)
- [27] J. M. Kelly, Seismic isolation system for developing countries. Earthq. Spectra. 18(3): 385-406. doi: [10.1193/1.1503339](https://doi.org/10.1193/1.1503339)
- [28] J.M. Kelly, D. Konstantinidis, Seismic response of standard thermal expansion bridge bearings. In: proceeding of the Caltrans bridge research conference. Sacramento California, Transportation Foundation and Cal Trans, 2005.
- [29] K. C. Chang, B.H. Lee, M.H. Lin, C.C. Chiang, Analytical and Experimental Studies on Seismic of Building with Mid-Story Isolation. (2009). doi: [10.1061/41084\(364\)78](https://doi.org/10.1061/41084(364)78)
- [30] ANSYS Logiciel APDL Ansys R12.0

- [31] ANDRE FILIALTRAULT. Elément de génie parasismique et de calcul dynamique des structures. Edition de Ecole polytechnique de Montréal, 1996.
- [32] Morishita, M., K. Inoue, and T. Fujita, Three dimensional seismic isolation technology for nuclear power plant application, in 9th World seminar on seismic isolation, energy dissipation and active vibration control of structures. June 13-16, 2005: Kobe, Japan.
- [33] Shimada, T., A. Otani, and K. Takahashi, Study on three-dimensional seismic baseisolation device for next generation power plants: Hydraulic seismic isolation device with rocking suppression system, in 9th World seminar on seismic isolation, energy dissipation and active vibration control of structures. June 13-16, 2005: Kobe, Japan.
- [34] Chang, K.C. Hwang, J. S., Chan, T. C., TAU, C. C & Wang, S. J. 2007. Application, R&D and Design Rules for Seismic Isolation and Energy Dissipation System for Building and Bridges in Taiwan. Proceeding of the 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. Istanbul Turkey.
- [35] Kamada T. & Tujita, T. 2007. Current Status of Seismic Isolation and vibration Control to Building, Cultural Heritage and Industrial Facilities in Japan. Proceeding of 10th world conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. Istanbul Turkey.
- [36] K. C. Chang, B. H. Lee, M. H. LIN, C. C. Chiang. Analytical and Experimental Studies Behavior of Buildings with Mid-Story Isolation. Department of Civil Engineering, National Taiwan university, Taipei, Taiwan.
- [37] Chopra, A. K. 2001. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 2nd ed. New Jersey : Prentice Hall.
- [38] S. Han et al., "Effect of metal vapor vacuum arc Cr-implanted interlayers on the microstructure of CrN film on silicon," *Thin Solid Films*, vol. 436, n°. 2, p. 238-243, Juillet. 2003.
- [39] Building Seismic Safety Council, NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, in FEMA 368, 369. 2001, National Institute of Building Sciences.
- [40] Keely, J.M. Griffith, M.C., Aiken, I.D., Displacement control and Uplift Restraint Device for Base Isolated Structures, Earthquake Engineering Research Center (Report n°UCB/EERC 87/03), Berkeley, University of California, April 1987.
- [41] Nakazawa, M., et al. Study on seismic base isolation of LWR plants (durability tests of laminated rubber bearings). In International conference on structural mechanics in reactor technology. 1991. Tokyo, Japan : Atomic energy society of Japan.

- [42] Zhang R, Weng D, Ren X. Seismic Analysis of a LNG Storage Tank Isolated by Multiple Friction Pendulum System. *Earth Eng Vib* 2011 ;10(2) :252-62
- [43] Soni DP, Mistry BB, Panchal VR. Double Variable Frequency Pendulum Isolator for Seismic Isolation of Liquid Storage Tanks. *Nucl Eng Des* 2011 ;241(3) :700-1
- [44] A. Kono (2001) « Kobe North Municipal Fire Station, » *MENSHIN* N^o.32 2001/5, p.15
- [45] Kitazawa, et al. (1977). « Base Isolation System with Sliding Bearing, Part 1 Outline of the System », *Proc. AIJ Annual Meeting*, Vol. B, p 817.
- [46] Emori, J. Yamanaka, H. et al. (1998). « An Experimental Study on Basic Mechanical Characteristics of Elastic, » *Proc AIJ Annual Meeting*, Vol. B -2, p. 487.
- [47] AFPS, *Recommandations pour la rédaction des règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes*, AFPS 90, tome I, II et III, Paris, Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, 1990, 1992, 1994.
- [48] Mostaghel, N., Tanbakuchi, J., (Response of Sliding Structures to Earthquake Support Motion), in *EESD*, vol.11, 1983, pp. 729/748.
- [49] Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A., *The FPS Earthquake Resisting System (Report n° UCB/EERC 87/01)*, Berkeley, University of California, June 1987.
- [50] Jolivet, F. and Richli, M. (1977). « A seismic Foundation System for Nuclear Power Station ». *Proc. 4SMiRT PAPER K9/2*.
- [51] Lu LY, Lee TY, Yeh SW. Theory and Experimental Study for Sliding Isolators with Variable curvature. *Earthq Eng Struct Dynam* 2011 :40(14) :1609-27.
- [52] Lu LY, Chang LI, Lin GI. Dynamic Analysis of Structures with Friction Devices Using Discrete-Time State-Space Formulation. *Comput Struct* 2006 ;84(15-16) :1049-71.
- [53] Z. Zhang et al., "Microstructures and tribological properties of CrN/ZrN nanoscale multilayer coatings," *Applied Surface Science*, vol. 255, n°. 7, p. 4020-4026, Jan. 2009.
- [54] Yeh IL. Analysis and experiment of base isolation using rocking bearings. Master's thesis. National Kaohsiung First University of science and Technology, Kaohsiung, Taiwan ; 2008 [In Chinese].
- [55] Lu Ly, Lin GI, Kuo TC. Stiffness Controlable Isolation System for Near-fault Seismic Isolation. *Eng Struct* 2008 ; 24(3) :747-114
- [56] PHAM. Khac. Hoan. *Vulnérabilité et Spectres de Plancher des Structures Sismiquement Isolées*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique. Domaine Mécanique Université de Lyon (France).

- [57] M. J. Puttock, E. G. Thwaite, Elastic compression of spheres and cylinders at point and line contact. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1969.
- [58] Landau, L. D., and Lifshitz, E. M. (1959). « Theory of Elasticity. » (Pergamon :London.)
- [59] Prescott, J. 1924. « Applied Elasticity. » (Longmans Green : London.) Dover :Newyork, 1961.) pp, 623-7
- [60] Kellogg, O.D. (1929). « Foundation of Potential Theory. » (Murray :New york.)
- [61] Y. Gachon . Etude de l'érosion par des particules solide de revêtement multicouchesobtenues par des procédés PVD sur substrat métallique (base de titane).Thèse de Doctoratde l'Ecole Centrale de Lyon. Département de Mécanique 1997.
- [62] F. Ledrappier. Méthodologie d'étude pour optimiser la tenue en fatigue superficielle des dépôts minces. Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon. Département de mécanique Septembre 2005.
- [63] A. Sekkal, "Etude des transformations tribologiques de surface ou " TTS " induites par Impacts à énergie contrôlée," Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 2000.
- [64] ANSYS programme Ansys R12.o,
- [65] ChristianLalanne. Vibrations et Chocs Mécaniques. Tome 1. Vibrations sinusoïdales. Paris : Hermes Science Publications, 1999 (p. 49-90). ISBN2-7 462-0035-X.
- [66]S. Hassani, J. Klemberg-Sapieha, M. Bielawski, W. Beres, L. Martinu, et M. Balazinski, "Design of hard coating architecture for the optimization of erosion resistance," Wear,vol. 265, n°. 5, p. 879-887, 2008.
- [67] M. Odén, J. Almer, G. Hakansson, et M. Olsson, "Microstructure-property relationship in arc-evaporated Cr-N coatings," Thin Solid Films, vol. 377, p. 407-412, Déc. 2000.
- [68] M. Odén, C. Ericsson, G. Hakansson, et H. Ljungcrantz, "Microstructure and Bibliographie- 141 - mechanical behavior of arc-evaporated Cr-N coatings," Surface and Coatings Technology, vol. 114, n°. 1, p. 39-51, Avr. 1999.
- [69] T. Polcar, N. Parreira, et R. Novak, "Friction and wear behaviour of Crcoatingattemperatures up to 500 °C," Surface and Coatings Technology, vol. 201, n°. 9, p. 5228- 5235, Fév. 2007.
- [70] A. Tricoteaux, P. Y. Jouan, J. D. Guerin, J. Martinez, et A. Djouadi, "Fretting wearproperties of CrN and Cr2N coatings," Surface and Coatings Technology, vol. 174, p.440-443, Sep.

- [71] K. Fujita et A. Yoshida, "Surface fatigue failure of case-hardened nickel-chromiumsteelrollers under pure rolling and sliding-rolling contacts," *Wear*, vol. 51, n° 2, p. 365-374, Déc. 1978.
- [72] W. Heinke, A. Leyland, A. Matthews, G. Berg, C. Friedrich, et E. Broszeit, "Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests," *ThinSolid Films*, vol. 270, n° 1, p.431-438, 1995.
- [73] A. Strawbridge et H. E. Evans, "Mechanical failure of thin brittle coatings,"*EngineeringFailure Analysis*, vol. 2, n° 2, p. 85-103, Juin. 1995.
- [74] C. Coupeau, "From thin film and coating buckling structures to mechanical properties,"*Materials Science and Engineering : A*, vol. 483, p. 617-619, Juin. 2008.
- [75] C. Coupeau et al., "Evidence of plastic damage in thin films around bucklingstructures," *Thin Solid Films*, vol. 469, p. 221-226, Déc. 2004. Bibliographie- 142
- [76] Z. Aslanet M. Sahin, "Buckling behavior and compressive failure of composite laminates containing multiple large delaminations," *Composite Structures*, vol. 89, n°3, p382-390, Juillet. 2009.
- [77] M. Y. He, A. G. Evans, et J. W. Hutchinson, "Interface cracking phenomena in constrained metal
- [78] M. He, A. Evans, et J. Hutchinson, "Effects of morphology on the decohesionofcompressed thin films," *Materials Science and Engineering A*, vol. 245, n° 2, p. 168-181, 1998.
- [79] B. L. French et J. C. Bilello, "In situ observations of the real-time stress-evolution anddelamination of thin Ta films on Si(100)," *Thin Solid Films*, vol. 446, n° 1, p. 91-98,Jan. 2004.
- [80] J. Song et al., "Buckling of a stiff thin film on a compliant substrate in large deformation," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, n° 10, p. 3107-3121, Mai. 2008.
- [81] G. Parry, J. Colin, C. Coupeau, F. Foucher, A. Cimetière, et J. Grillé, "Effect of substrate compliance on the global unilateral post-buckling of coatings: AFMObservations and finite element calculations," *ActaMaterialia*, vol. 53, n° 2, p. 441-447, 2005.
- [82] G.Despaux,F.Agereau, J.Ferrandis, et D. Baron,"Caractérisationdespropriétésmécaniques des matériaux de l'industrie du nucléaire par microscopie acoustique," *Bibliographie- 148 - Matériaux 2002*, 2002.
- [83] J. ATTAL, "Microscopie acoustique," *Techniques de l'ingénieur*, n° 1402, 1998.(Chang et al. 2007 ; Kamada et Fujita, 2007 ; Zhou et al, 2007).

[84] Politopoulos, I. nd P. Sollogoub, *Vulnerability of elastomeric bearing isolated buildings and their equipment*. Journal of Earthquake Engineering, 2005. **9**(4) : p. 525 -546.

[85] Priestley, M.J.N. Myths and fallacies in earthquake engineering revisited. in The Mallet Milne Lecture. 2003: IUSS Press.