

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL
N° :**



**DOMAINE : GENIE CIVIL
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : STRUCTURE**

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: Boudiaf Djellal & Boudiaf Ridhouane

Intitulé

**Réduction de l'effet sismique par isolation
à la base**

Soutenu devant le jury composé de:

Mahamedi Abdelkrim
Boulaouad abd erachid
Menasri Youcef

Université M'sila
Université M'sila
Université M'sila

Président
Rapporteur
Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont donné un magnifique

Modèle de labeur et de persévérance.

A toute la famille

A tous mes amis

A toute personne m'a aidé de près et de loin à

La réalisation de ce travail.





Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant qui grâce à lui j'ai accompli ce modeste travail.

*Je tiens à **remercier** dans un premier lieu le directeur de CGS de Alger pour son accueil et la confiance qu'il nous a accordée dès notre arrivée dans le bureau d'étude.*

*Je **remercie** également notre encadreur de ce mémoire, monsieur boulaouad abd erachid Pour son aide et ses conseils qui m'ont permis de progresser et terminer notre travail.*

*Un grand **remerciement** destiné à tous mes enseignants de Génie civil de l'Université M'sila qui m'ont accompagné tout au long de notre cursus universitaire par*

Leurs conseils et leurs expériences.

*Je **remercie** toutes les personnes qui ne trouvent pas leurs noms sur cette page mais qui M'ont aidé à réaliser ce mémoire.*

Merci

ملخص

على الرغم من كل المراجعات، بقيت القوانين الجزائرية المضادة للزلازل ناقصة ومتأخرة مقارنة بكثير من القوانين الدولية. من بين هذه النقائص يمكن أن نذكر عدم الاهتمام بتقنية "العزل القاعدي" التي تبدو مهمة وواحدة.

بعض الدول مثل اليابان قد أحرزت تقدما كبيرا وحققت نتائج مقبولة في هذا المجال الذي يبقى شبه مجهول في الجزائر. ولهذا، فإن البحوث ينبغي أن توجه في هذا المحور. هذه الدراسة، التي تندرج في هذا السياق، تهدف إلى عرض هذه التقنية الجديدة من الناحيتين النظرية والعملية.

Résumé

Malgré toutes les révisions, le code Algérien présente encore de grandes défaillances et un Retard important par rapport aux autres codes à travers le monde. Parmi ces défaillances, on Peut citer le manque d'intérêt pour la technique d'isolation à la base (appuis parasismiques) Qui semble intéressante et prometteuse.

Certains pays tels que le Japon ont déjà acquis une bonne expérience dans le domaine avec Des résultats satisfaisants. En Algérie, cette technique est presque inconnue.

Les travaux de recherche doivent donc s'orienter selon cet axe.

Cette étude qui s'inscrit dans ce cadre, vise à la présentation de cette nouvelle technique Des deux points de vue : théorique et pratique.

Abstract

Despite all the revisions, the Algerian seismic code still presents great lacks and is very late in comparison with other codes over the world, particularly in the domain of "base-Isolation".

Some countries such as Japan have acquired good experience with satisfactory results in this domain. In Algeria, this technique is nearly unknown.

So, the research works must be oriented in this way.

Our study presents this new technique from the theoretical and practical points of view.

SOMMAIRE

Introduction-Problématique	1
Recherche Bibliographique	2
<u>Chapitre I : Notions préliminaires à la sismologie</u>	
I-1. Introduction	11
I-2. L'origine des séismes	13
I-3. Les ondes sismiques	14
I-4. Le Micro zonage	15
<u>Chapitre II : principes et techniques de l'isolation sismique à la base</u>	
II-1. Les appuis parasismiques	17
II-2. Principe de base et fondements théoriques	17
II-3. Les différents types d'appuis parasismiques	18
II-3-1. Les appuis à déformation	18
II-3-2. Les appuis à glissement	20
II-3-3. Les appuis à déformation et glissement	20
II-3-4. Les appuis à roulement	21
II-4. Amortisseurs parasismiques	22
II-4-1. Les différents types d'amortisseurs parasismiques	22
II-4-2. Amortisseurs hystérétiques	23
II-4-3. Amortisseurs visqueux	23
II-4-4. Amortisseurs à frottement	24
II-4-5. Amortisseurs magnétiques	25
II-5. Formulation des équations du mouvement et analyse des structures isolées	25
II-5-1. Structure isolée à 2 degrés de liberté	25
II-6. Dispositions constructives et mise en œuvre	29
<u>Chapitre III : Applications et résultats</u>	
III-1. Modes propres	37
III-1-1. Pulsations naturelles w_i	37
III-1-2. Modes propres $\{a_i\}$	37
III-2. Facteur de participation modale	38
III-3. Expansion modale des forces sismiques effectuent	38
III-4. Réponse statique modale	39
III-5. Facteur d'amortissement modal	39

III-6. Réponse au pseudo-accel ($\frac{S_a}{g}$) pour les 2 modes	39
III-7.comparaison entre les 2 systèmes (avec isolation et sans isolation)	40
III-7-1.Effort tranchant pour le système avec isolation	40
III-7-2.Effort tranchant pour le système sans isolation	40
Conclusion et Perspectives	43

Introduction-Problématique

Le Nord de l'Algérie compte parmi les régions les plus touchées par les secousses Sismiques à travers le monde.

D'après les Règles Parasismiques Algériennes (RPA0), le "Centre de Recherche Appliquée En Génie Parasismique" (C.R.A.A.G.) a recensé 85 séismes de plus ou moins grande intensité Entre 1716 et 1989, c'est-à-dire environ un séisme tous les trois ans. Entre 1980 et 1989, 26 Séismes se sont produits (environ un séisme tous les quatre mois !).

Le début de cette décade a été particulièrement marquant pour l'histoire de la sismicité en Algérie après le tragique séisme de Chlef survenu le 10/10/1980 (de magnitude 7,2 à l'échelle Richter qui en compte 9) causant un grand désastre tant humain que matériel (environ 3500 Morts et d'énormes dégâts matériels).

Cet événement fut la clé de voûte dans le développement d'une réglementation sismique Algérienne puisque, juste une année après, on assista à la naissance du premier code Algérien En matière de construction parasismique, officiellement approuvé en 1983, d'où le nom de "R.P.A. 81 version 83". Plus récemment encore, le séisme de Boumerdes (2003) fut tout aussi Violent (de magnitude 6,8) provoquant la mort de plus de deux milles personnes et des pertes Estimées à plus de deux milliards de dinars, poussant ainsi à des révisions sérieuses du code, Après celles de 88 et 99 de type plutôt formel. Ce qui fait qu'à l'heure actuelle, on parle de "R.P.A.2003".

Malgré toutes ces révisions, le code Algérien présente encore de grandes défaillances et Un retard important par rapport aux autres codes à travers le monde. Parmi ces défaillances, on Peut citer le manque d'intérêt pour une nouvelle technique de construction parasismique visant à réduire l'effet sismique par isolation à la base (appuis parasismiques) qui semble intéressante Et prometteuse.

Certains pays tels que le Japon ont déjà acquis une bonne expérience dans le domaine avec Des résultats satisfaisants. En Algérie, cette technique est encore à l'état embryonnaire.

Les travaux de recherche doivent donc s'orienter selon cet axe.

Cette étude qui s'inscrit dans ce cadre, vise à la présentation de cette nouvelle technique Des deux points de vue : théorique et pratique.

Historique :

L'isolation sismique de la base est un concept simple remontant au début du 20^{ème} siècle. Cependant, les premières applications modernes dans le monde n'ont été réalisées que dans les Années 70 à 80. Une structure ne doit pas nécessairement être extrêmement résistante, L'isolement à la base constitue une méthode de construction parasismique plus efficace [1]. Dans les années 50, la technologie structurale des blocs en caoutchouc flexible a été employée Pour isoler des bâtiments induits par la vibration des chemins de fer (figure 1), Le trafic de véhicule, le vent...etc. [2].

La première application d'isolateurs en caoutchouc « Rubber Isolation System » dans le But de la protection sismique de structure a été réalisée en 1969 dans une école primaire à Skopje (ex- Yougoslavie).

Les progrès faits dans la technologie des appuis de caoutchouc laminé en 1970 [8], ont permis D'attirer l'attention sur l'isolation sismique comme une réalité pratique [3].

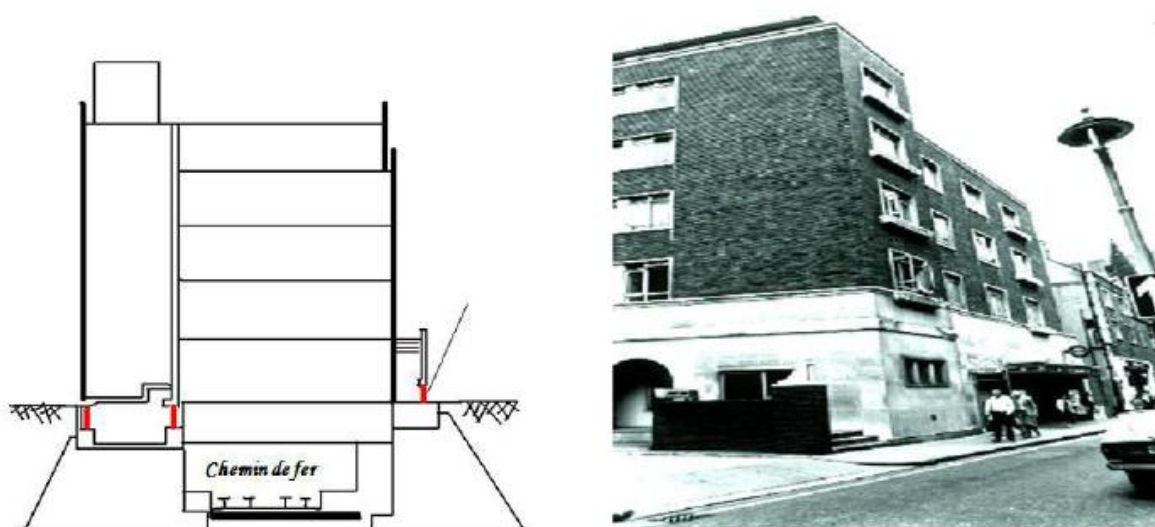


Figure 1. Bâtiment d'un tribunal en Angleterre traité ayant des isolateurs de base [2]

L'isolation sismique à la base consiste à désassocier le mouvement du sol du mouvement De la structure afin de réduire les forces transmises à cette dernière.

L'isolateur reçoit les déformations et filtre les accélérations afin que la superstructure (construction élevée sur une autre) se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant De faibles accélérations et quasiment pas de déformations (Figure 2). Ainsi, les forces

Recherche Bibliographique

D'inertie 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, après le séisme, la fonctionnalité de la structure est préservée.

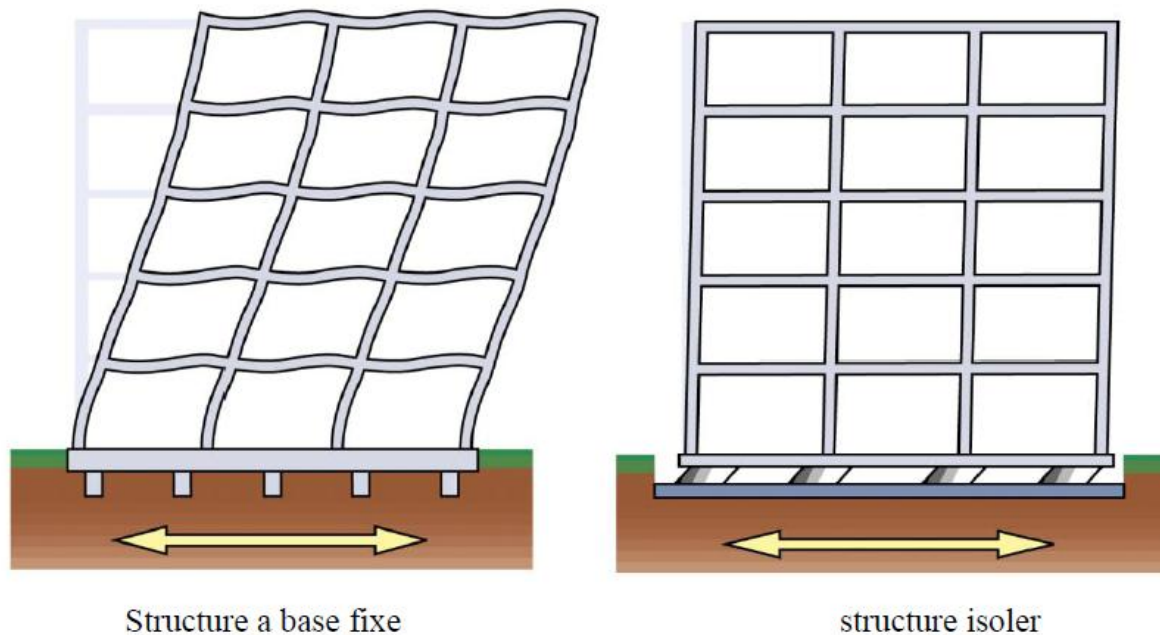


Figure 2. Comportements des structures lors d'un séisme [5]

Première mise en œuvre d'isolation sismique moderne

Cette structure de 4 blocs, situés à 12 kilomètres de la faille de San Andreas à Rancho Cucamonga, a été le premier bâtiment aux ÉTATS-UNIS dans le monde utilisant le haut Amortissement en caoutchouc naturel (HDRB) qui peut supporter des secousses allant jusqu'à 8.3 Richter, Le sous-sol comporte des systèmes d'isolation, composés de 98 isolateurs

De multicouches en caoutchouc naturel renforcés avec des plaques d'acier [6].



Figure 3. Foothill Communities Law & Justice Center, California

Application mondiale des systèmes d'isolation :

Japon :

Au Japon, le nombre d'applications des systèmes d'isolation, a eu une augmentation subite Après le Grand Hanshin-Awaji (ou Hyogo-ken,) tremblement de terre qui a frappé Kobe le 17 Janvier 1995.

Au cours des dernières années environ 100 grands bâtiments étaient annuellement isolé au Japon, à laquelle un grand nombre de maisons. Cela a conduit a un nombre global de 1700 Bâtiments isolé en octobre 2003 et plus de 2700 en juin 2005.



Figure 4. La tour cristal de Kobé [4]

Les Etats-Unis

Aux Etats-Unis, contrairement au Japon, la croissance de l'utilisation des systèmes D'isolation sismique a été très lente au cours des dernières années.

Dans ce pays, la technique d'isolation est relativement limitée à des structures stratégiques Et publiques et la moitié de ces applications sont des réhabilitations [4].

a. L'université de Californie à Los Angeles, protégée par des isolateurs. Cette structure a résisté au séisme de Northridge 1994.

b. Hôtel de ville de San Francisco, construit en 1912 et qui a été endommagé par le séisme de LomaPrietaen1989, puis il a été isolé au moyen de 530 isolateurs en 2000.



Figure 5.Réhabilitation des structures à usa par des systèmes d'isolations [4]

Italie

Une des premières utilisations de systèmes d'isolation sismique dans ce pays est le système De pendule à friction (Figure 6). Après le tremblement de terre 2009, le quartier Aquila ont été reconstruites en utilisant ce type d'isolation.

La surface de friction est recouverte d'un matériau non corrosif (Téflon) ; la courbure de La friction d'amortissement est de 4 m, l'obtention de 20% avec un déplacement de 260 mm [7].



Figure 6. Aquila bâtiments du quartier et le système de pendule de frottement utilisés

Turquie

Après le tremblement de terre en 1999 les ingénieurs ont commencé à être plus préoccupés Par ce problème. Le premier bâtiment équipés par des systèmes d'isolation été l'hôpital public D'Erzurum, dans l'est Turquie (Figure 7), il est devenu l'un des plus grands hôpitaux dans le Monde avec des systèmes d'isolation a la base.



Figure 7. Hôpital d'Erzurum [7]

L'expérience Algérienne

En Algérie, Lors de l'organisation des deux Journées Scientifiques et Techniques (Décembre 2003) organisées par le Cabinet Conseil MCM en partenariat avec le partenaire Malais, le Malaisien Rubber Board (MRB), grâce à l'aide des responsables du Ministère de L'Habitat et de l'Urbanisme il avait pu inviter pratiquement l'ensemble des acteurs scientifiques Et techniques de la construction en Algérie.

Journées suivies attentivement par les grands décideurs institutionnels et par la presse, à L'issue desquelles, après plusieurs échanges d'informations, le Président du CTC Chlef a pris L'initiative de réaliser le premier projet pilote algérien de construction sur isolateurs de Fondations en caoutchouc à Ain Défla. (Zone III) [6].

Le projet été un immeuble de bureaux de deux étages avec sous-sol, emprise de sol 280m², Surface ensemble plancher plus de 1000m², hauteur 11metres. Dans la conception de ce projet, Ils ont tenu à prévoir un sous-sol qui servirait de vitrine pédagogique pour pouvoir voir les Isolateurs de fondations installes et toute les innovations qui seront introduites au niveau des Système de canalisations et de réseaux (électricité, gaz, etc.), ajoutant que ce sous-sol dispose D'un accès direct à partir de l'extérieur pouvant servir ainsi de sortie de secours.

Les étages disposent quand a eu une très grande liberté d'agencement, de fonctionnement Et de circulation, avec le hall d'accueil qui permet l'accès à l'ensemble des étages qui se fait Par la cage d'escalier directement accessible [4].

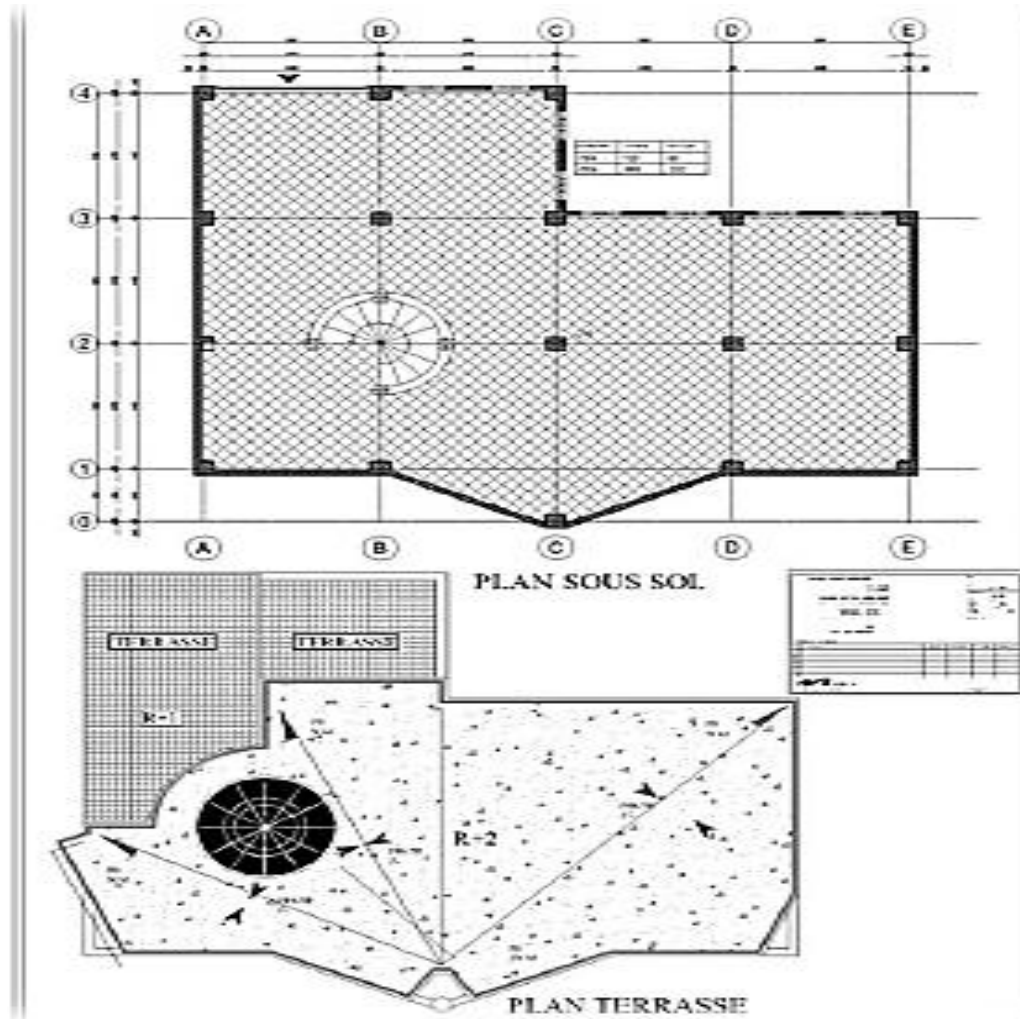


Figure 8.Plans architectural du projet [6]



Figure 9. Installation des dispositifs parasismiques [6]

Chapitre I

Notions préliminaires à la sismologie

I-1. Introduction

Les séismes sont l'une des catastrophes « naturelles » des plus destructives à la différence des inondations, des cyclones ou des éruptions volcaniques. Les séismes avec leurs apparitions inattendues, frappent en quelques secondes donnant aucune chance de fuir, causent d'énorme destruction et souvent de nombreuses victimes.

Le risque sismique auquel sont exposées de plus en plus les agglomérations urbaines est devenu un phénomène mondial. Une coopération à l'échelle mondiale est nécessaire pour un échange d'information et d'expérience pour la prévention et la mise en place de plans de gestion et d'actions dans les pays sujets à ce phénomène dont la tâche est de sauvegarder les vies humaines et limiter considérablement les dommages.

Les séismes provoquent des handicaps majeurs tels que la désorganisation du tissu urbain et du tissu économique et la structure sociale et peuvent remettre en cause tout développement dans les régions où ils se déclenchent. Dans certains cas, une catastrophe peut remettre en cause le processus de développement et effacer des années d'efforts. Il importe donc d'entreprendre une véritable réflexion sur la prévention avant d'investir dans des programmes de développement qui pourraient se trouver réduits à néant par une catastrophe [9].

Les études de prévention sismique conduisent de plus en plus à des études de microzonage afin de localiser les zones les plus dangereuses.

Dans la plupart des pays en voie de développement, les mesures de prévention s'avèrent inexistantes pour les tissus détériorés par le temps, par les phénomènes naturels (pluie, vent et séisme), l'abandon et la négligence ainsi que le manque d'entretien régulier, adéquat et efficace.

Un élément important concernant la vulnérabilité urbaine, c'est la population, d'après les dernières données statistiques du PNUD (ONU), la population urbaine est multipliée par vingt (20) alors que la population mondiale seulement par quatre (4). Dans les pays développés, 75% de la population vit dans les villes, (concentration au sein des mégapoles : 20 d'entre elles ont dépassé les 10 millions d'habitants). Les explications de cette attraction vers la ville (la misère, l'isolement des campagnes et le mouvement vers les lumières de la ville) [10].

L'Algérie dont 60% de la population vit aujourd'hui dans les villes [11], est au centre des préoccupations de la recherche dans le domaine du risque « naturel ».

Alors que le 20ème siècle a vu un gigantesque progrès dans l'avancement de la science et Du développement technologique, économique et social, mais ce progrès n'a pas été réalisé Dans la réduction du nombre de pertes en vies humaines et économiques et de telles Catastrophes sont dues à la croissance rapide de la population, à une urbanisation rapide et Anarchique, et à une dégradation de l'environnement. Il apparaît actuellement que les Catastrophes deviennent de plus en plus nombreuses, plus diversifiées et complexes devant une Société qui est de plus en plus vulnérable.

Le début du 21ème siècle est en train d'être marqué par une accélération des risques Majeurs liés aux catastrophes « naturelles » telles que les séismes. Ceci constitue le plus grand Défi aujourd'hui pour les scientifiques et les pouvoirs publics. Les fréquences des séismes, de Par le monde ces derniers temps, interpellent les décideurs en premier lieu et la communauté Scientifique en second lieu vers une attention particulière orientée sur les études liées non Seulement aux structures des ouvrages d'art et des bâtiments mais aussi à la planification et L'organisation spatiale de la ville liant aux risques sismiques.

Tenant compte que la problématique liée au risque sismique est d'autant plus cruciale qu'il Est nécessaire, voir primordial pour nous scientifiques de définir quelles sont les outils ou les Méthodes à donner aux différents intervenants dans l'acte de concevoir ou de réaliser la ville à Savoir les architectes, les urbanistes , les aménageurs, les ingénieurs et les pouvoirs publics Afin de pouvoir insérer la problématique du risque sismique dans tous les domaines liés à la Planification et la gestion de la ville.



Avant le séisme



Après le séisme

Figure I-1. Zone d'habitation, région de Boumerdes, Algérie (AZZOUZ et al, 2005)

I-2. L'origine des séismes

La tectonique des plaques, dont le principe est connu depuis la seconde moitié du XXe Siècle, est à l'origine des chaînes de montagne et de phénomènes tels que les séismes et le Volcanisme.

La lithosphère (croûte et manteau supérieur) est morcelée en plusieurs fragments, appelés Plaques, qui constituent la surface terrestre. En raison des mouvements de convection au sein Du manteau, ces plaques sont mobiles les unes par rapport aux autres, avec des vitesses de Quelques centimètres par an.

Les mouvements des plaques peuvent être divergents (extension), convergents (compression) ou en coulissage (cisaillement). Environ 90% des séismes sont localisés au Voisinage des limites de ces plaques.

Alors qu'en profondeur, les plaques se déplacent régulièrement de quelques millimètres à Quelques centimètres par an, dans la partie supérieure de la croûte terrestre (30 premiers km), Ce mouvement n'est pas continu. Les failles peuvent rester bloquées durant de longues Périodes, tandis que le mouvement régulier des plaques (convergence ou divergence) se Poursuit.

De ce fait, la région de la faille bloquée se déforme progressivement (déformation élastique Lente) en accumulant de l'énergie, jusqu'à céder brutalement ; c'est la rupture sismique, les Contraintes tectoniques se relâchent, la faille est à nouveau bloquée, et le cycle sismique Recommence.

En effet, un tremblement de terre est dû au mouvement relatif de deux blocs dont la surface De Contact est appelée : plan de faille. Son étude consiste d'abord à le localiser, en latitude, Longitude et profondeur. Ensuite, on le caractérise en déterminant les paramètres géométriques Du plan de la faille (azimut et pendage), la direction du glissement dans ce plan et le moment Sismique qui donne la magnitude du séisme.

Les efforts tectoniques peuvent occasionner des déplacements au niveau d'une faille (foyer). Cette libération brutale d'énergie occasionne une vibration du sol : le séisme.

A la surface du sol, le point situé à la verticale du foyer est appelé : épicentre.

Le foyer peut être situé à faible profondeur (quelques kilomètres), on parle alors de séisme Superficiel, ou à grande profondeur (plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres), on parle Alors de séisme profond.

Le séisme est d'autant plus violent en surface que la quantité d'énergie emmagasinée au Niveau de la faille avant le séisme est importante et que la faille est proche de la surface.

En revanche, lorsque le foyer est profond, les ondes sismiques vont se répercuter largement Vers la surface, mais elles seront peu à peu atténuées et dispersées dans l'épaisseur de l'écorce Terrestre, et le séisme sera moins intense.

Les séismes peuvent être ressentis et destructeurs à plusieurs centaines de kilomètres de L'épicentre (Mexico, 1985).

Le foyer est le point de départ de la rupture des roches.

L'épicentre est le point de la Surface terrestre situé à la verticale du foyer.

La magnitude mesure l'énergie libérée par le Séisme au niveau du foyer.

L'intensité mesure les conséquences du séisme en surface.

I-3. Les ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. L'onde peut traverser un milieu sans Modifier durablement ce milieu. L'impulsion de départ va "pousser" des particules Elémentaires, qui vont "pousser" d'autres particules et reprendre leur place et ainsi de suite.

La théorie de l'élasticité montre qu'à travers un milieu homogène peuvent se propager deux Sortes d'ondes : des ondes correspondant à des vibrations longitudinales, qui sont les plus Rapides, et des ondes transversales plus lentes. Ces deux sortes d'ondes correspondent aux deux Premières sortes oscillations des sismogrammes. La troisième correspond à des ondes un peu Plus lentes encore se propageant à la surface.

Les vitesses de propagation ont, dans la théorie de l'élasticité, des expressions où Interviennent la densité et les propriétés mécaniques du milieu ; comme les scientifiques Peuvent les déterminer expérimentalement, on a ainsi les renseignements sur les propriétés Mécaniques du globe et leur variation avec la profondeur.

L'onde de Love : le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes *S* Sans Mouvement vertical.

Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux Dégâts aux fondations des édifices.

L'onde de Rayleigh : le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement à la fois horizontal et vertical, elliptique, en fait.

Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s, elles sont plus rapides que les ondes de Rayleigh [13].

I-4. Le Micro zonage

La micro zonation sismique identifie les zones présentant une homogénéité de cause et Effets, qui sont caractérisées par certains paramètres : la fréquence des séismes et la distribution De leurs intensités et définit sur chacune de ces régions le comportement du site sous séisme Et l'aléa correspondant.

Les cartes de micro zonage estiment donc la réaction d'un site sous l'effet d'un évènement Catastrophique tel que le séisme.

L'Urbaniste et l'Architecte doit impérativement connaître le micro zonage du site à Urbanisé et ce avant la conception du projet - Cela permettra une meilleurs maîtrise de l'espace A construire et une réduction de la vulnérabilité sur la structure urbaine.

Le zonage pour l'occupation du sol est la première étape à aborder. Il implique la Délimitation des secteurs de micro zonage sismique.

Exemple : Le territoire national Algérien (CGS, 2004) est subdivisé en 5 zones de sismicité Croissante soit [12] :

- 1. **Zone 0** : sismicité négligeable ;
- 2. **Zone I** : sismicité faible ;
- 3. **Zone IIa et IIb** : sismicité moyenne ;
- 4. **Zone III** : sismicité élevé.

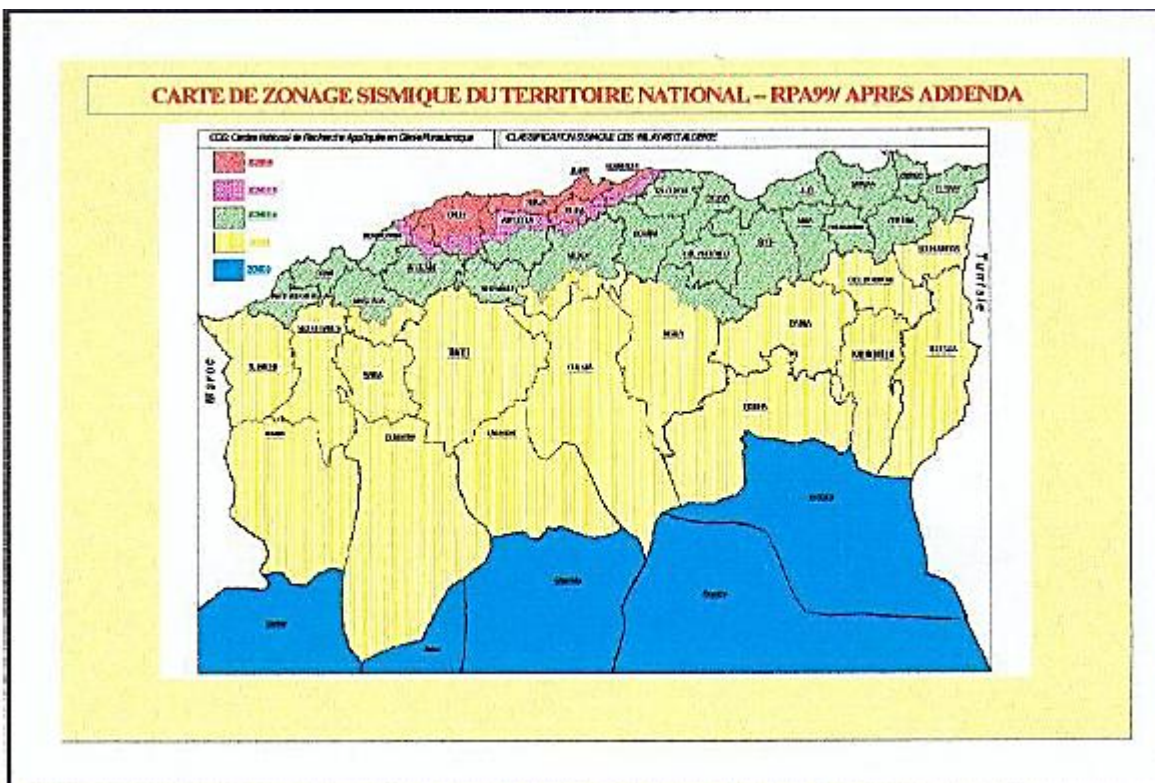


Figure. I.2 : La carte de micro zonage Algérien. (C.G.S, 2004) [12].

Chapitre II

**principes et techniques de
l'isolation sismique à la base**

II-1. Les appuis parasismiques

Les appuis parasismiques ou les isolateurs parasismiques sont des dispositifs permettant une isolation partielle entre la fondation et la superstructure, ils ne laissent passer que des Efforts déterminés par leurs propres caractéristiques. Ils doivent permettre des déplacements Horizontaux importants grâce à leur faible rigidité horizontale devant celle de la structure, par Ailleurs ils présentent une grande rigidité verticale avec une capacité de supporter les charges Gravitaires de la structure pendant et hors séisme.

La structure qui repose sur des appuis parasismiques s'appelle une structure isolée.

II-2. Principe de base et fondements théoriques

L'isolation parasismique repose sur le principe que : si la période de vibration est Augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du séisme, Qui varie dans une plage de fréquences allant de 2 à 10 Hz, les accélérations transmises à la Structure (et par conséquent les forces d'inertie) sont considérablement réduites ainsi que la Vitesse d'oscillation de la structure.

Le bâtiment se comporte dans la direction horizontale Comme un oscillateur simple. En Revanche, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants, 15cm ou Plus (suivant l'importance du séisme), qui se localisent principalement au niveau des appuis, Cela influe sur la stabilité globale du bâtiment, ce problème est posé particulièrement dans le Cas des structures légères. Ces déplacements peuvent être réduits en couplant ces derniers avec Des dispositifs appelés amortisseurs permettant la dissipation de l'énergie.

Cette solution est aujourd'hui presque toujours utilisée afin de contrôler les déplacements Et de réaliser un compromis satisfaisant entre la réduction de la force et l'accroissement du déplacement.

La figure suivante (**Fig. II.1**) montre l'effet des appuis parasismiques :

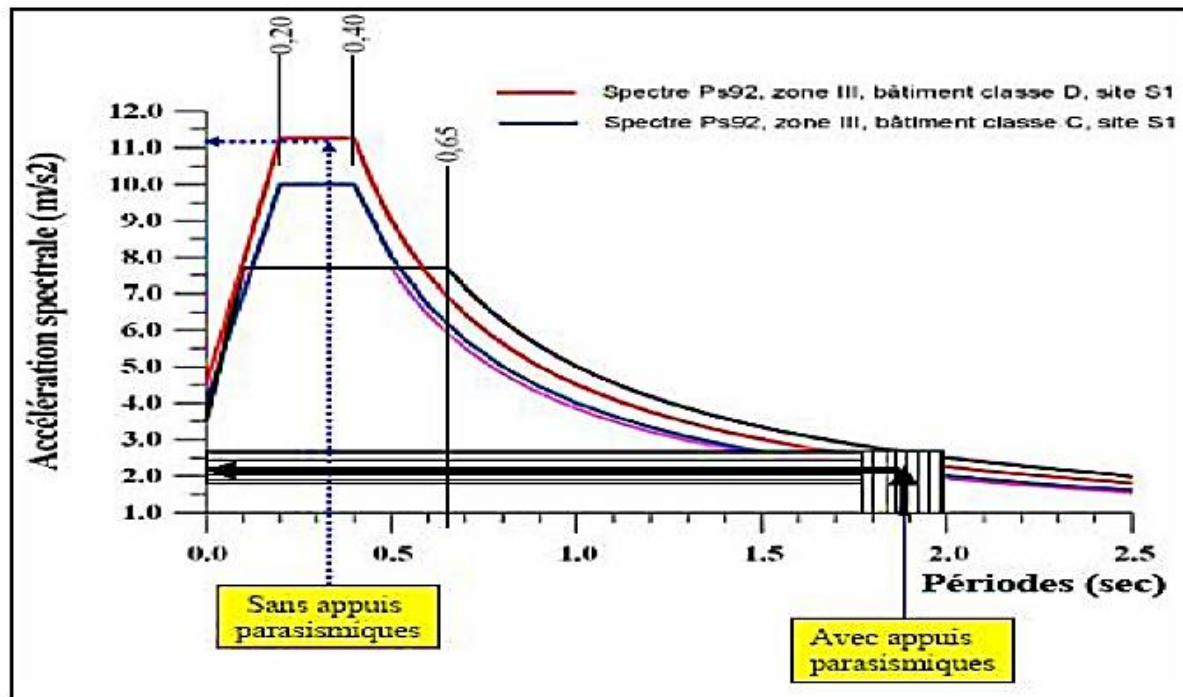


Fig. II.1 : L'effet des appuis parasismiques

Grâce à leur grande rigidité verticale, les appuis parasismiques n'isolent pas la structure vis-à-vis des secousses verticales. Par conséquent, les accélérations verticales transmises à la construction ne sont pas filtrées. Elles sont sensiblement égales à celles du sol, cela veut dire que l'action sismique verticale passe intégralement dans le bâtiment. Le balancement et le roulis de la superstructure sont par conséquent supprimés.

II-3. Les différents types d'appuis parasismiques

Plusieurs types d'appuis parasismiques existent. Certains ont déjà été utilisés, d'autres sont restés au stade d'études théoriques. Selon leur mode de fonctionnement, ils peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Appuis à déformation ;
- Appuis à glissement ;
- Appuis à déformation et glissement ;
- Appuis à roulement, etc.

II-3-1. Les appuis à déformation

Les appuis à déformation utilisés depuis plus de 40 ans, ont toujours montré un comportement satisfaisant, ces appuis sont réalisés en élastomère fretté (couches alternées d'élastomère, caoutchouc naturel ou élastomère synthétique (néoprène) et de plaques métalliques (frettes)) analogues aux appuis couramment utilisés pour les ponts (appareils d'appuis), ils sont caractérisés par les propriétés suivantes :

Chapitre II principes et techniques de l'isolation sismique à la base

- La déformabilité horizontale est assurée par les couches d'élastomère, on admet Généralement une distorsion de **1** pour ces élastomères, la rigidité verticale des appuis Est assurée par la présence des frettes.
- L'amortissement correspondant varie entre 4% et 12%, un amortissement plus élevé Peut être obtenu pour certains types d'élastomères, par conséquent ils sont sujets d'un Fluage important ; il est à noter que les élastomères sont défavorablement affectés par Les variations de température.
- La résistance à la fatigue du caoutchouc est très élevée puisqu'une éprouvette de Caoutchouc peut supporter sans rupture plus d'un million de cycles de chargement et De déchargement en traction avec une élongation de 100%.

Le vieillissement du caoutchouc est actuellement très satisfaisant. Le caoutchouc est Protégé contre l'ozone et l'oxygène de l'air par des produits incorporés dans le mélange au Moment de la vulcanisation ; en outre, les plaques d'acier sont revêtues d'une peinture Anticorrosion à haute résistance et les amortisseurs sont protégés du rayonnement solaire Direct. Il en résulte une durée de vie attendue au moins égale à celle de l'immeuble.

- Ces appuis sont très compacts, ils ne s'échauffent et ne brûlent que très lentement. En Cas d'incendie, ils continueraient à supporter la charge bien après que l'immeuble soit hors D'usage. Néanmoins, il est prévu un certain nombre de butées limitant la flèche et, sur demande, Les appuis peuvent être munis d'une coquille de protection spéciale.

On distingue différents types d'appuis à déformation tels que les appuis en caoutchouc Fretté et les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb (voir **Fig. II.2** ci-dessous).

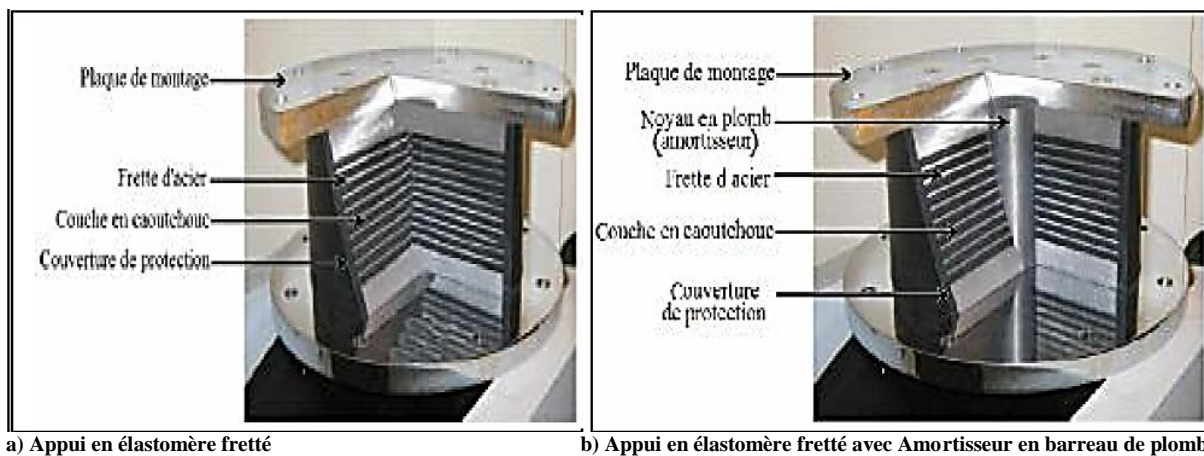


Fig. II.2 : Les différents types d'appuis à déformation

II-3-2. Les appuis à glissement

Ce système est composé de plaques solidaires à la superstructure et d'autres plaques fixées aux Fondations et leur interface constitue le plan de glissement. Le matériau des deux séries de Plaques n'est pas nécessairement le même. Le débord de la plaque la plus grande doit au moins Egal à 1.2 fois le glissement maximal pour éviter la formation d'empreinte en cas d'absence Durable de secousses, la plaque la plus grande doit être plus dure que la petite plaque (voir **Fig. II.3 (a)**).

La réponse d'un bâtiment reposant sur ce type d'appui est conditionnée par le coefficient De frottement entre les plaques ainsi que la masse du bâtiment. L'intensité des forces sismiques

Horizontales transmises vers la structure et inversement proportionnelle à la valeur du Coefficient de frottement entre les deux plaques. Le déplacement résiduel après un séisme de Ces plaques est un problème qui peut être résolu en prévoyant un système de recentrage.

Les appuis à glissement conviennent aussi bien pour les constructions sur sols durs que sur Les terrains meubles car pour les faibles coefficients de frottement des plaques la réponse de La superstructure est indépendante du contenu fréquentiel du mouvement sismique.

Parmi ces appuis, on peut citer les appuis en pendules glissants qui comportent une Interface de glissement sous forme de cuvette (portion d'une sphère) qui confère à la structure Un mouvement global similaire à un pendule (voir **Fig. II.3 (b)**).

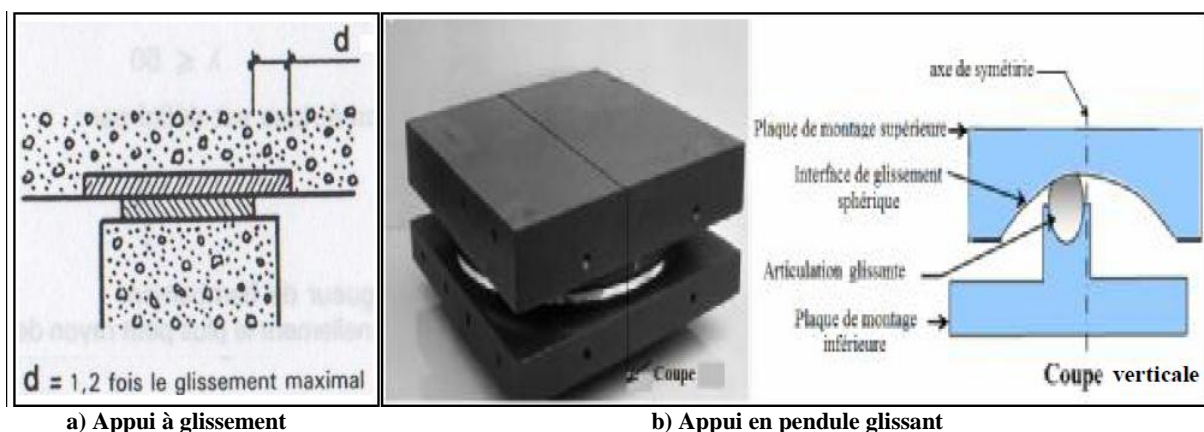


Fig. II.3 : Les différents types d'appuis à glissement

II-3-3. Les appuis à déformation et glissement

Il s'agit d'un dispositif combinant les deux types d'appuis sur mentionnés, il est constitué Par l'association des plaques de glissement et des appuis à déformation (voir **Fig. II.4**).

Dans un premier temps, les isolateurs se déforment latéralement grâce à la distorsion de L'élastomère.

Lorsque la force nécessaire à l'accroissement de la distorsion devient supérieure à la force de frottement entre les plaques, ce qui ne se produit que lors des séismes de très forte intensité, Le glissement commence. Pendant un séisme violent, il peut se produire plusieurs glissements.

Ce système entraîne une réduction à la fois des accélérations et des déplacements de la Superstructure et conduit ainsi à une diminution importante des efforts tranchants à sa base.

Ceci est particulièrement avantageux dans le cas des constructions sur fondations Profondes, plus sensibles au cisaillement que les fondations superficielles.

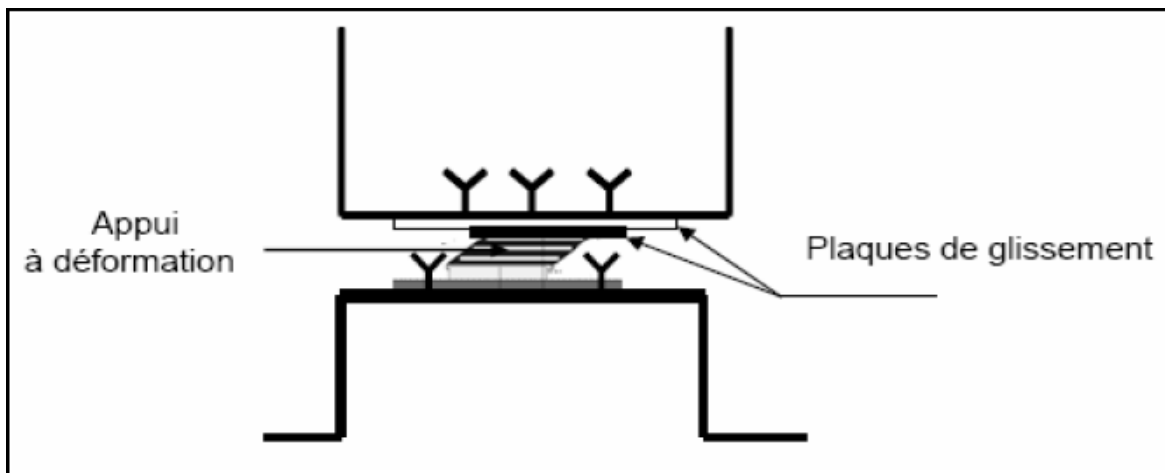


Fig. II.4 : Appui à déformation et glissement

II-3-4. Les appuis à roulement

Pour permettre des mouvements dans deux directions, on utilise des billes sphériques ou Deux couches orthogonales de rouleaux cylindriques (voir Fig. II.5). Des appuis ovoïdaux ont été utilisés pour un bâtiment expérimental de 7 niveaux à Sébastopol (Ukraine). Lors de chaque déplacement, les ovoïdes entraînent un léger soulèvement de la construction qui a alors tendance à revenir à sa position initiale.

Ces systèmes d'appuis peuvent être complétés par un dispositif de blocage vis-à-vis de l'action du vent ainsi que des amortisseurs parasismiques peuvent être prévus afin de limiter les déplacements.

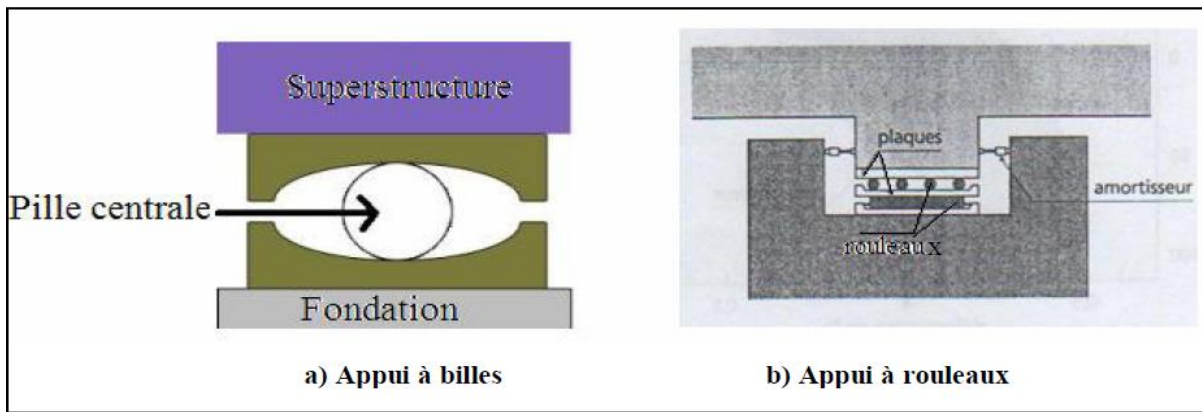


Fig. II.5 : Appuis à roulements

Bien que plusieurs systèmes d'appuis à roulement aient été proposés, il n'existe que très peu de réalisations de ce type en raison des inconvénients qu'ils comportent, dont les principaux sont le grippage après une période prolongée sans sollicitation et leur faible amortissement.

II-4. Amortisseurs parasismiques

Les amortisseurs parasismiques sont des dispositifs spéciaux qui ont pour objectif de fournir un amortissement supplémentaire aux structures afin de diminuer à la fois les efforts et les déplacements (les amplitudes d'oscillation) de la structure en dissipant l'énergie introduite dans les bâtiments durant les cycles de chargement alternés, ils peuvent être utilisés en superstructure des bâtiments non isolés ou bien accouplés en série avec les appuis parasismiques, cette solution est aujourd'hui presque toujours utilisée sachant bien que les amortisseurs parasismiques n'ont aucun rôle porteurs.

II-4-1. Les différents types d'amortisseurs parasismiques

Un certain nombre de dispositifs d'amortisseurs sont actuellement en service ou proposés pour l'usage en structures conventionnelles ou en association avec des appuis parasismiques dans les structures isolées.

Les amortisseurs utilisés pour les structures de génie civil soumises à des actions dynamiques potentiellement importantes (séisme) ont un comportement qui peut s'éloigner notablement du domaine élastique linéaire, ils sont plus souvent hystérétiques, visqueux ou à frottement.

On distingue plusieurs types d'amortisseurs parasismiques, certains ont déjà été utilisés, d'autres sont restés au stade d'études théoriques ou d'essais aux laboratoires de recherche.

On distingue quatre familles principales d'amortisseurs à savoir :

- Amortisseurs hystérétiques ;

- Amortisseurs visqueux ;
- Amortisseurs à frottement ;
- Amortisseurs magnétiques.

II-4-2. Amortisseurs hystérésiques

Ils sont appelés aussi amortisseurs élasto-plastique, l'énergie est dissipée par plastification

Alternée d'éléments très ductiles tels que l'acier doux, plomb, alliages. Il s'agit le plus souvent, De déformation plastique d'acier soumis à flexion, mais il existe d'autres dispositifs à base de Torsions de poutres en acier. Le montage de ces amortisseurs devrait permettre un Remplacement facile, ils ne demandent pas d'entretien et peuvent supporter plusieurs centaines De cycles de déformations post élastiques avant de se rompre.

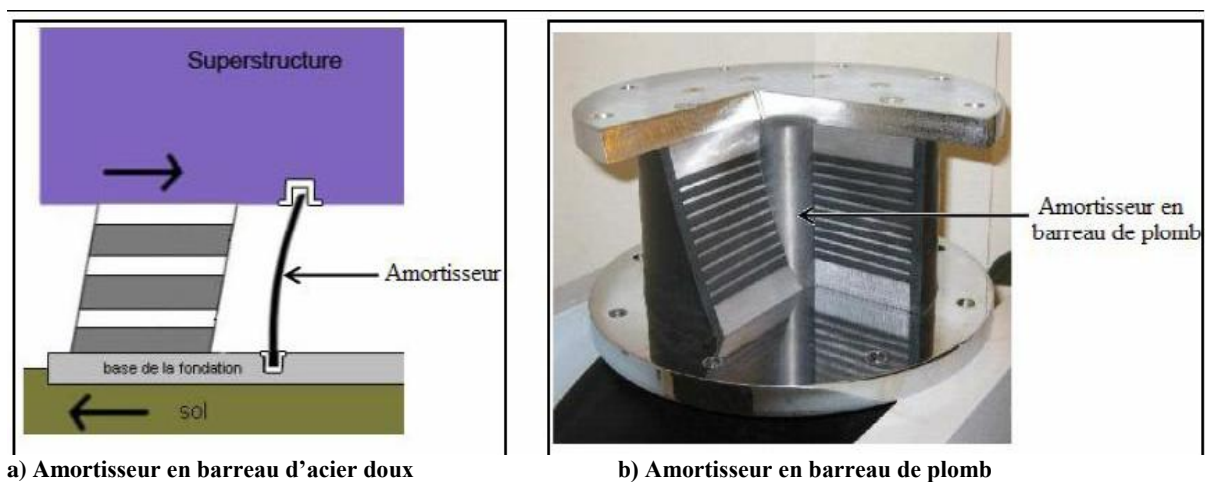


Fig. II.6 : Les différents types d'amortisseurs hystérésiques

II-4-3. Amortisseurs visqueux

Ces systèmes sont constitués de tiges solidaires à la structure plongeant dans un matériau Très dense mais déformable, comme le bitume de grande viscosité, le plomb (qui a la propriété De se recristalliser après déformation), l'huile de grande densité. De même que les amortisseurs Hystérésiques, ils se déforment tout en opposant une résistance assurant ainsi une plus grande Stabilité du bâtiment.

Le désavantage de ces amortisseurs est le besoin de maintenir la température pour le fluide.

De nombreux types d'amortisseurs visqueux existent : amortisseurs à huile, amortisseurs A fluide visqueux et amortisseurs à extrusion de plomb.

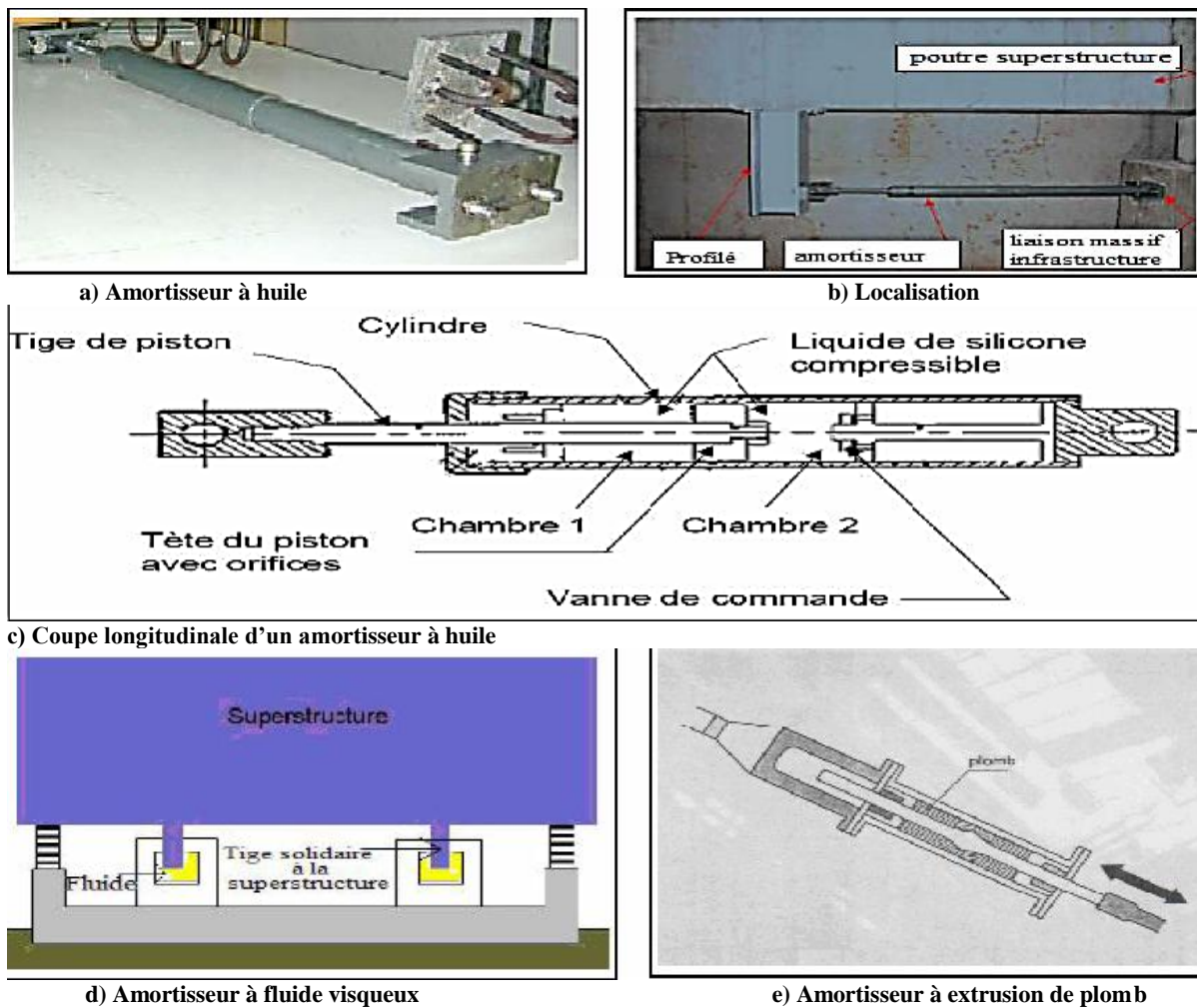


Fig. II.7 : Les différents types d'amortisseurs visqueux

I-4-4. Amortisseurs à frottement

Ces amortisseurs reposent sur le même principe que les appuis à glissement cités plus haut.

Cependant, à la différence ils sont disposés à divers endroits stratégiques de la Superstructure et dissipent l'énergie par un frottement sec. Lors d'un tremblement de terre, il Permet la déformation du bâtiment tout en la maîtrisant son système mécanique coulissant fait Qu'il reste toujours porteur. Ces amortisseurs se révèlent être les plus efficaces et les plus Durables, puisqu'ils reprennent leur position initiale sans dommages.

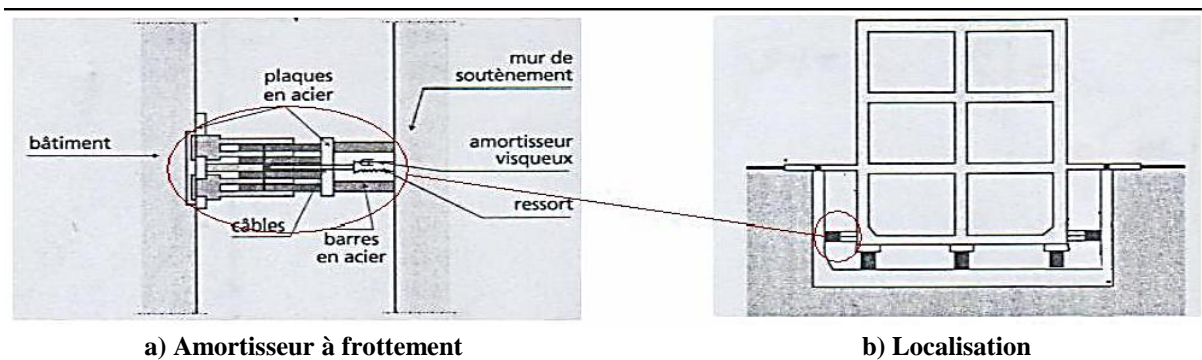


Fig. II.8 : Amortisseurs à frottement

II-4-5. Amortisseurs magnétiques

Ces systèmes n'ont jamais été utilisés jusqu'à présent, ils sont restés aux stades d'études Théoriques, les essais aux laboratoires de recherche ont permis de démontrer Expérimentalement que les amortisseurs magnétiques peuvent réduire les déplacements à la Base des immeubles de 20 à 30%.

II-5. Formulation des équations du mouvement et analyse des structures isolées

Pour comprendre le comportement des structures isolées à $(n+1)$ degrés de liberté, il est Utile de faire une analyse d'une structure à un seul niveau reposée sur un système d'isolation (en caoutchouc fretté par exemple) ce qui fait un modèle à deux degrés de liberté (voir Fig.II.9).

II-5-1. Structure isolée à 2 degrés de liberté

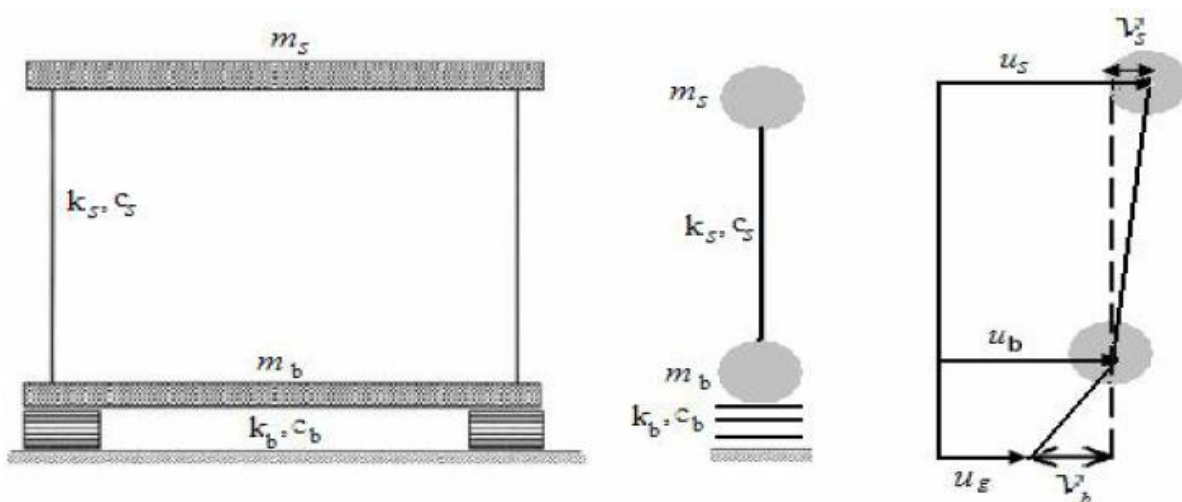


Fig.II.9 : Paramètres d'une structure à deux degrés de liberté

Le modèle mathématique de cette structure est représenté dans la Fig.II.10 :

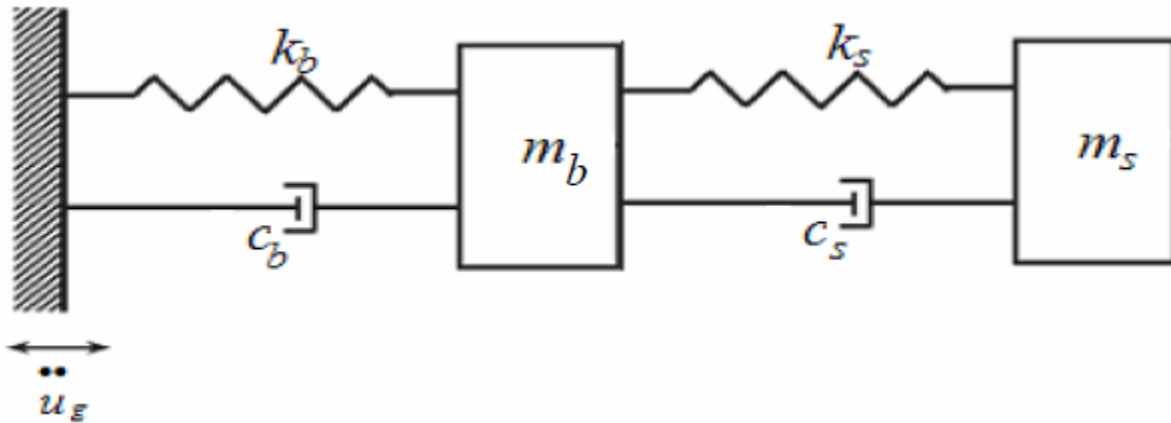


Fig.II.10 : Modèle mathématique

u_s, u_b : sont les déplacements absolus de m_s, m_b respectivement.

v_s, v_b : sont les déplacements relatifs de m_s, m_b respectivement.

Où : $v_b = u_b - u_g$ $v_s = u_s - u_b$

Les équations du mouvement du modèle structural, une fois excité par un séisme en terme

De déplacements absolus sont :

$$m_s \ddot{u}_s + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s (u_s - u_b) = 0$$

$$m_s \ddot{u}_s + m_b \ddot{u}_b + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) = 0$$

D'où en termes de déplacements relatifs, les équations précédentes deviennent :

$$m_s \ddot{v}_s + m_s \ddot{v}_b + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g$$

$$(m_s + m_b) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g$$

Sous la forme matricielle, les équations du mouvement deviennent :

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

Où :

$$[\mathbf{M}] = \begin{pmatrix} \mathbf{M} & m_s \\ m_s & m_s \end{pmatrix} \text{ Avec } M = m_s + m_b \quad [\mathbf{C}] = \begin{pmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{pmatrix} \quad [\mathbf{K}] = \begin{pmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{pmatrix}$$

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} \text{ et } \{r\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Les fréquences propres sont déterminées par la relation suivante :

$$\text{Det} ([\mathbf{K}] - \omega_n^2 [\mathbf{M}]) = 0$$

$$\text{Det} \left(\begin{pmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{pmatrix} - \omega_n^2 \begin{pmatrix} m & m_s \\ m_s & m_s \end{pmatrix} \right) = 0$$

L'équation caractéristique pour la détermination des fréquences ω_n est donnée par :

$$(1 - \gamma)\omega_n^4 - (\omega_s^2 + \omega_b^2)\omega_n^2 + \omega_s^2\omega_b^2 = 0$$

Chapitre II principes et techniques de l'isolation sismique à la base

Avec $\frac{m_s}{M} = \gamma$, $\frac{k_s}{m_s} = w_s^2$, $\frac{k_b}{M} = w_b^2$

Les solutions de cette équation sont alors :

$$w_1^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ (w_s^2 + w_b^2) - [(w_s^2 + w_b^2)^2 - 4(1-\gamma)w_s^2w_b^2]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$w_2^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ (w_s^2 + w_b^2) + [(w_s^2 + w_b^2)^2 - 4(1-\gamma)w_s^2w_b^2]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

La plus petite valeur de w_1 et w_2 notée w_b^* représente la fréquence d'isolation translattée,

L'autre valeur notée w_s^* représente la fréquence modifiée de la structure.

Posons $\varepsilon = \frac{w_b^2}{w_s^2}$ ou e varie entre 10^{-1} et 10^{-2} vu que $w_b \ll w_s$.

Les deux équations de w_1 et w_2 , en tenant compte de ε , se réduisent à :

$$w_1^2 = w_b^2(1 - \gamma\varepsilon)$$

$$w_2^2 = \frac{w_s^2}{(1-\gamma)}(1 + \gamma\varepsilon)$$

Du fait que e est de l'ordre de 10^{-2} , il peut être suffisamment précis dans beaucoup de cas

De prendre comme approximation pour w_1 et w_2 les premiers termes :

$$w_1^2 = w_b^2 \quad \text{et} \quad w_2^2 = \frac{w_s^2}{(1-\gamma)}(1 + \gamma\varepsilon)$$

Les modes propres de vibration de la structure associés aux fréquences approximatives sont

Déterminés par l'équation suivante :

$$([K] - w_n^2[M])\{\Phi^n\} = \{0\}$$

$$\begin{cases} (w_b^2 - w_n^2)\Phi_b^n - w_n^2\gamma\Phi_s^n = 0 \\ -w_n^2\Phi_b^n + (w_s^2 - w_n^2)\Phi_s^n = 0 \end{cases}$$

Le premier mode $\Phi^1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{Bmatrix}$, correspond à la pulsation w_1

Le deuxième mode $\Phi^2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \frac{1-(1-\gamma)\varepsilon}{\gamma} \end{Bmatrix}$, correspond à la pulsation w_2

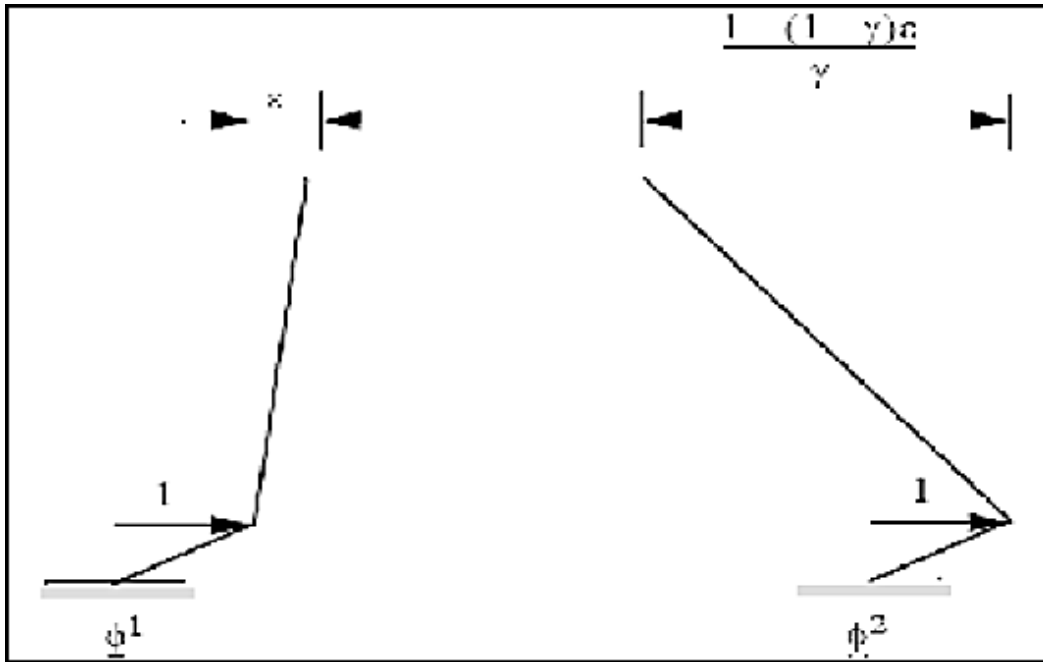


Fig.II.11 : La forme des modes propres de la structure isolée (2 ddl).

La **Fig.II.11**, indique que la structure est presque rigide dans le premier mode Φ^1 , du fait que la fréquence du premier mode peut être considérée en tant qu'une petite modification de la fréquence du système d'isolation. Par contre, le deuxième mode Φ^2 entraîne la déformation dans la structure et le système d'isolation parce que la fréquence de la structure est sensiblement augmentée par la présence de la masse de la base.

Après que les deux modes sont obtenus, les déplacements relatifs v_s, v_b peuvent être écrits

Comme suit :

$$v = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_b^1 & \Phi_b^2 \\ \Phi_s^1 & \Phi_s^2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix}$$

Où :

q_1, q_2 : Coefficients modaux dépendants du temps, ils sont donnés par :

$$q_1 = \frac{L_1}{w_1} \int_0^t \ddot{u}_g(t-\tau) e^{w_1 \beta_1 \tau} \sin w_1 \tau d\tau \quad \text{et} \quad q_2 = \frac{L_2}{w_2} \int_0^t \ddot{u}_g(t-\tau) e^{w_2 \beta_2 \tau} \sin w_2 \tau d\tau$$

L_1, L_2 : Les facteurs de participation du premier et du deuxième mode dans la réponse, ils sont donnés par :

$$L_1 = 1 - \gamma \epsilon \quad \text{et} \quad L_2 = \gamma \epsilon$$

Du fait que, $\gamma < 1$ et que ϵ est de l'ordre de 10^{-2} , le facteur de participation dans la réponse

Pour le deuxième mode qui entraîne la déformation dans la structure est très petite.

Par conséquent, ce résultat montre l'efficacité des systèmes d'isolation, car quand la valeur De la Fréquence du deuxième mode est translatée à une valeur plus élevé que celle associée au Cas d'une structure à base fixe, le décalage entre ces deux valeurs isole la structure du Mouvement fort du séisme.

β_1, β_2 :: Les rapports d'amortissements modaux pour la structure et le système d'isolation, ils sont donnés par :

$$\beta_1 = \beta_b \left(1 - \frac{3}{2} \gamma \varepsilon\right) \text{ et } \beta_2 = \frac{1}{(1-\gamma)^2} (\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^2)$$

Par la suite, les valeurs maximales de q_1, q_2 sont données par :

$$|q_1|_{max} = L_1 S_D(w_1, \beta_1) \text{ et } |q_2|_{max} = L_2 S_D(w_2, \beta_2)$$

$\beta(w, b)$: Le déplacement spectral du mouvement du sol, à la fréquence w et au facteur d'amortissement b .

Ainsi, les déplacements v_s, v_b maximums sont donnés par :

$$|v_s|_{max} = \varepsilon S_D(w_b, \beta_b) \text{ et } |v_b|_{max} = S_D(w_b, \beta_b)$$

En fin, les forces sismiques F_s et F_b sont donnés par :

$$F_s = m_s \{S_A^2(w_1, \beta_1) + \varepsilon^2 (1 - \gamma)^2 (1 - 2\varepsilon)^2 S_A^2(w_2, \beta_2)\}^{\frac{1}{2}}$$

$$F_b = m_b w_b^2 \left\{ (1 - \gamma \varepsilon)^2 \frac{S_A^2(w_2, \beta_2)}{w_1^4} + \gamma \varepsilon^2 \frac{S_A^2(w_2, \beta_2)}{w_2^4} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

II-6. Dispositions constructives et mise en œuvre

L'installation d'un tel système n'est pas simple, car il intervient après de nombreuses Etudes, au niveau du terrain et des bâtiments, pour savoir si celui-ci est approprié.

En effet, il faut vérifier que ce système vieillira bien, et ne devra pas être remplacé avant La fin de la durée de vie prévue du bâtiment (Vieillessement accéléré due à la température, à L'hygrométrie et aux agents chimiques). Il faut aussi que ce système puisse résister à des Séismes même plus importants que ceux prévu lors de la conception.

L'emploi des appuis parasismiques n'exige pas d'architecture spéciale mais il convient D'observer quelques règles particulières de conception et de mise en œuvre :

Un espace libre de dimensions suffisantes doit être disposé autour de la superstructure, afin De permettre son libre déplacement dans toutes directions horizontales.

L'espace entre deux blocs adjacents disjoints sur appuis parasismiques doit être suffisant Pour permettre des mouvements en opposition de phase sans risque de choc.

Chapitre II principes et techniques de l'isolation sismique à la base

Les valeurs de déplacement calculées sont :

- a) Dans le cas d'un joint entre la superstructure et des ouvrages liés au sol, la valeur absolue Maximale (d) du déplacement d'un point quelconque de la superstructure situé au bord du joint.
- b) Dans le cas de deux blocs adjacents sur appuis parasismiques, la valeur maximale de la Somme des valeurs absolues des déplacements d_1 et d_2 de deux points quelconques en regard De part et d'autre du joint.

Les valeurs de déplacement calculées doivent être majorées de 20% pour le Dimensionnement des joints.

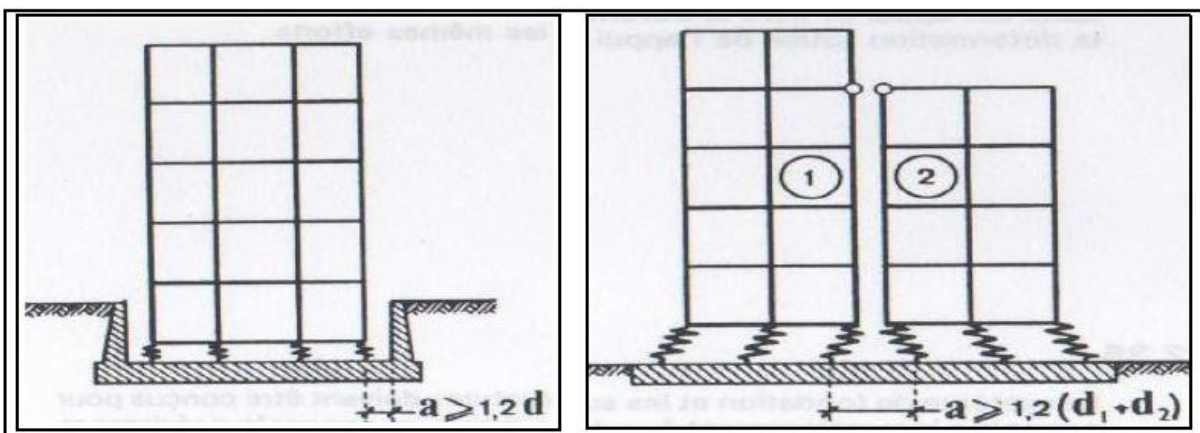


Fig. II.12 : Les conditions de voisinage

Les appuis parasismiques sont placés de préférence au niveau du sol sous chaque colonne Ou chaque intersection de murs. Ils doivent être insérés entre deux plans horizontaux rigides, De façon à ce que la distance des appuis entre eux reste invariable pendant la durée du séisme.

Deux cas sont à considérer :

- a) L'immeuble comporte un sous-sol dans ce cas, les appuis sont disposés entre le plancher bas Du RDC et la partie haute du sous-sol, cette dernière devant être assez rigide pour se déplacer Comme un ensemble, il est nécessaire de prévoir des murs de soutènement extérieurs Permettant à la construction de se déplacer librement, ou de réaliser des talus de faible pente (2/3) au plus.

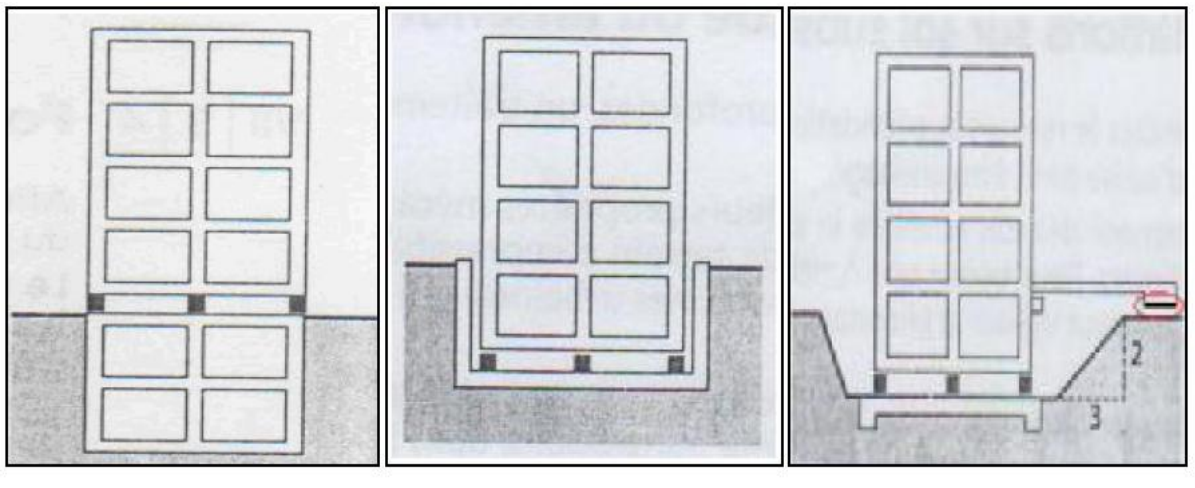


Fig. II.13 : Emplacement des appuis parasismiques

b) L'immeuble ne comporte pas de sous- sol dans ce cas, les appuis sont fixés sur des plots en Béton armé encastrés, soit sur un radier, soit directement dans le sol de fondation avec un Chaînage en béton armé assurant une liaison entre les plots ; ils supportent le plancher bas du RDC comme dans le cas (a).

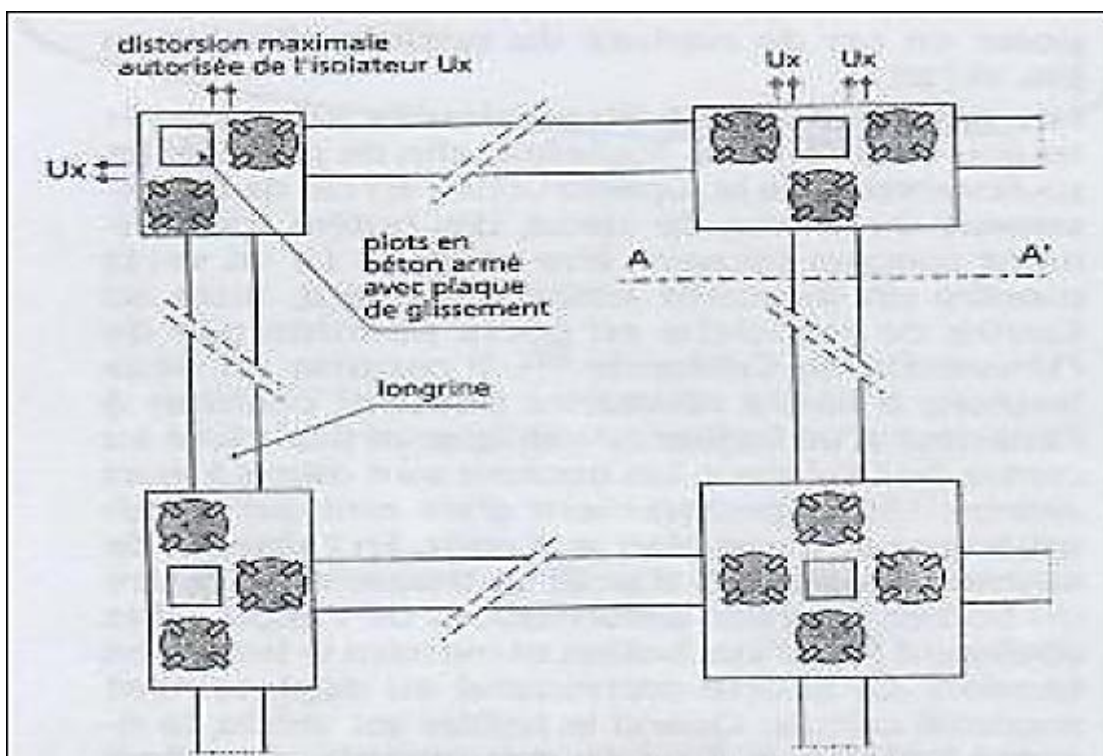


Fig. II.14 : Vue en plan des différentes positions possibles

- Les cas spéciaux où la fondation comporte plusieurs niveaux doivent être soigneusement Etudiés de façon à réaliser des connexions très rigides entre les différents niveaux.

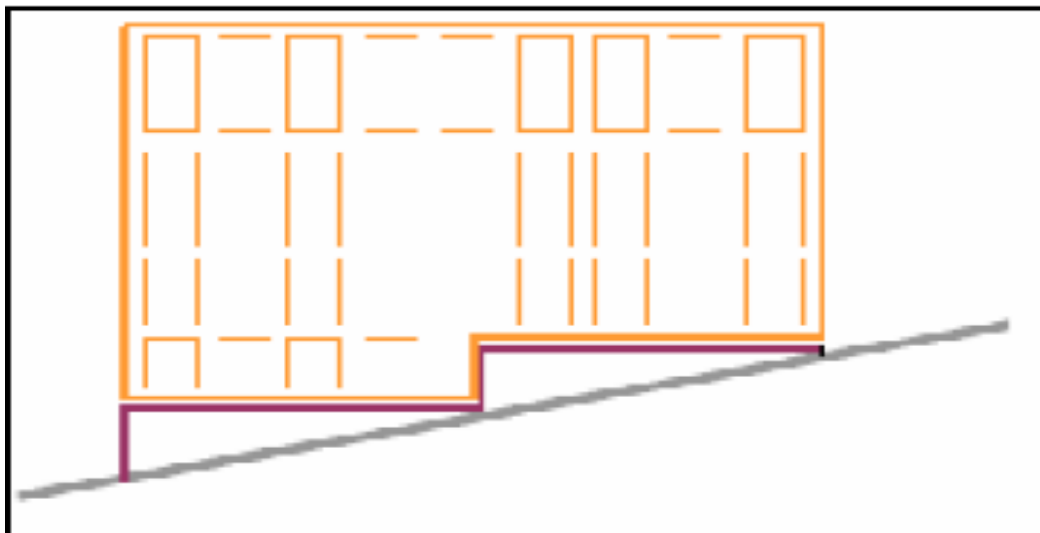


Fig. II.15 : Fondation à plusieurs niveaux

Les appuis sont solidement fixés aux deux systèmes de planchers au moyen de boulons en Acier ancrés dans le béton. Ce mode particulier de fixation permet le remplacement ultérieur Des appuis si nécessaire.

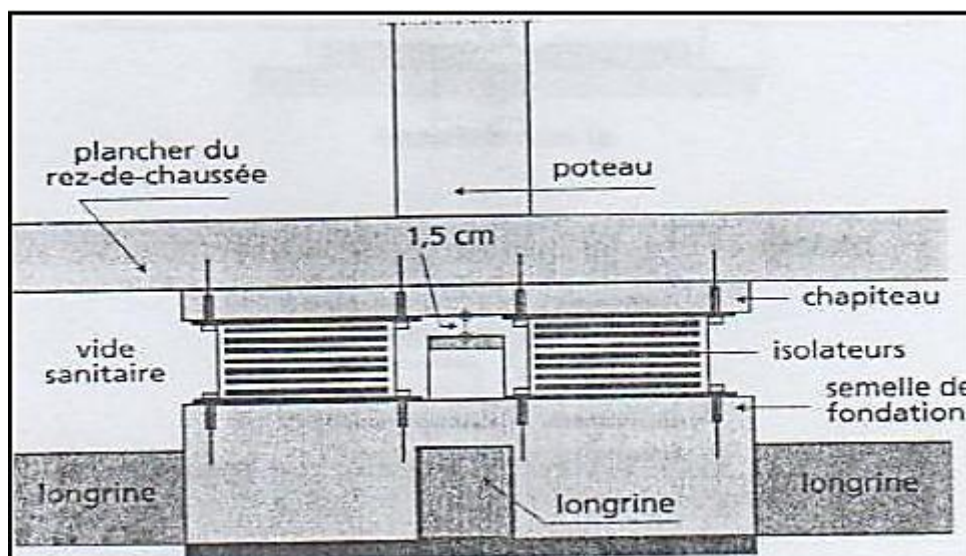


Fig. II.16 : Mise en œuvre

Les connections entre les réseaux de fluides intérieurs et extérieurs doivent pouvoir résister Aux déplacements de calcul majorés de 20%.

L'attention est particulièrement attirée sur les situations accidentelles supplémentaires Occasionnées par les dommages subis par les réseaux de gaz.

Par ailleurs, la fonction d'étanchéité doit être préservée pour les réseaux offrant un risque Consécutif à une fuite.

Chapitre II principes et techniques de l'isolation sismique à la base

Les réseaux visés dans la condition d'étanchéité sont notamment les réseaux de gaz, D'incendie, ou plus généralement de fluides offrant des risques de pollution graves ou D'incendie, et les réseaux dont le maintien en service est nécessaire à l'intervention des secours.

Le détail du plan de l'interface du système d'isolation est simple lorsque cette interface est Horizontale.

Par contre pour les emplacements en pente, la structure doit être posée graduellement.

Néanmoins, cette manière peut causer beaucoup de problème.

Chapitre III

Applications et résultats

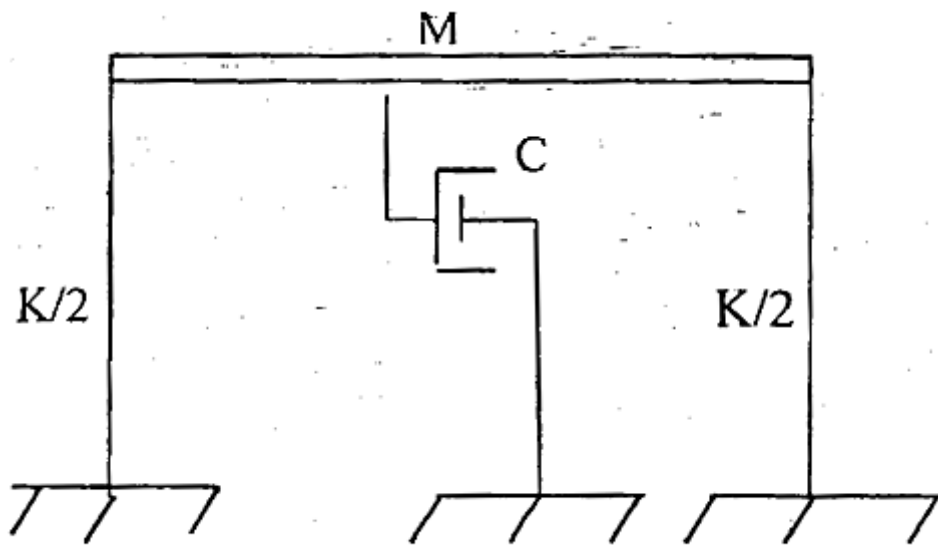
L'étude de l'effet de l'isolation à la base sur l'effort tranchant et le déplacement de la structure, a été faite selon la méthode de l'expansion modale exposée par **Anil K.Chopra** de l'université de Berkeley en Californie dans son excellent ouvrage : 'dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering'[16].

Pour simplifier, on considère une structure à 1 degré de liberté.

Pour le système à plusieurs degrés de liberté, le principe est le même.

Soit la structure suivante :

1. structure sans isolation



$$M=m$$

$$K=k$$

$$T=T_f = 0.4 \text{ s}$$

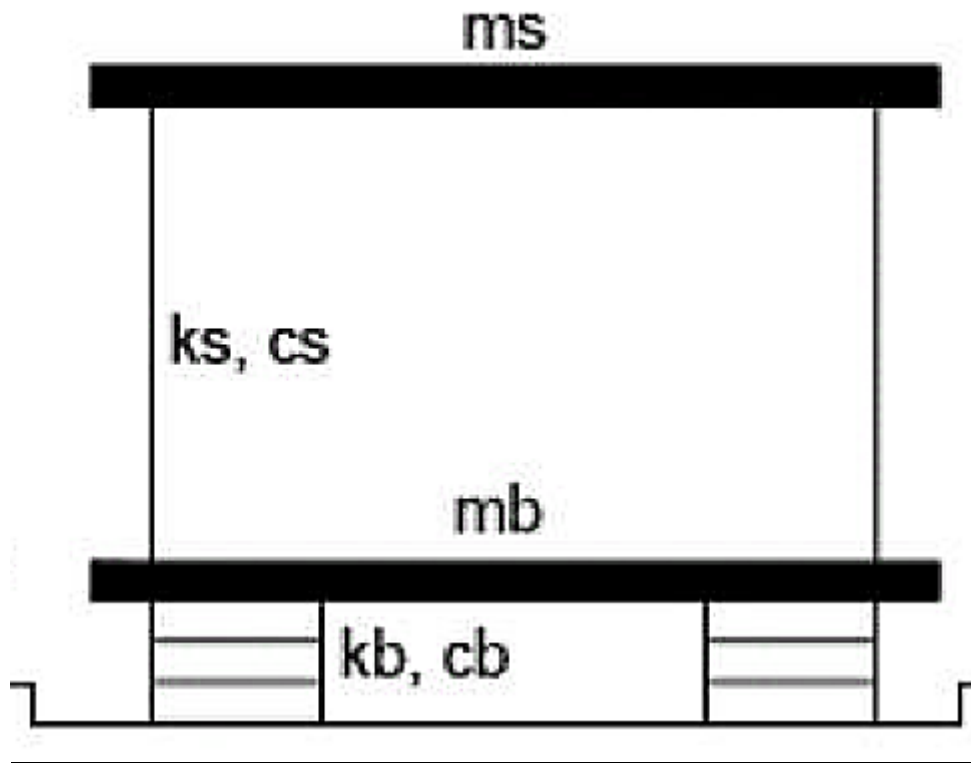
2. structure avec isolation

$$M_1 = m_b = \frac{2}{3}m$$

$$M_2 = m_s = m$$

$$T_b = 2 \text{ s}$$

$$T_f = 0.4 \text{ s}$$



$$T_f = 0.4s = \frac{2\pi}{w_f} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\rightarrow \frac{m}{k} = \frac{0.4^2}{4\pi^2} = \frac{16 \times 10^{-2}}{4\pi^2} = \frac{4 \times 10^{-2}}{\pi^2}$$

$$\rightarrow K = \frac{m\pi^2}{4 \times 10^{-2}} = 246.5m \quad (k2)$$

$$T_b = 2s = \frac{2\pi}{w_b} = 2\pi \sqrt{\frac{m+m_b}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{5}{3}m}{k_b}}$$

$$\rightarrow \frac{5}{3} \frac{m}{k_b} = \frac{4}{4\pi^2} = \frac{1}{\pi^2}$$

$$\rightarrow k_b = \frac{5}{3} \pi^2 * m = 16.433m \quad (k1)$$

$$\rightarrow K * k_b = 246.5m * 16.433m = 4051m^2$$

$$\rightarrow K + k_b = 246.5m + 16.433m = 263m$$

$$[M] = \begin{pmatrix} \frac{2}{3}m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix}$$

$$[K] = \begin{pmatrix} k + k_b & -k \\ -k & k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 263 & -246.5 \\ -246.5 & 246.5 \end{pmatrix} m$$

III-1. Modes propres

III-1-1. Pulsations naturelles w_i

$$[[K] - w^2[M]] = 0 \quad \left[\begin{pmatrix} 263 & -246.5 \\ -246.5 & 246.5 \end{pmatrix} m - w^2 \begin{pmatrix} \frac{2}{3}m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \right] = 0$$

$$\rightarrow M_1 M_2 w^4 - [(k k_b) M_2 + M_1 k] w^2 + k k_b = 0$$

$$\frac{2}{3} m^2 w^4 - \left[263m * m + \frac{2}{3} m * 246.5m \right] w^2 + 4051m^2 = 0$$

$$\frac{2}{3} m^2 w^4 - 427m^2 w^2 + 4051m^2 = 0$$

$$w^4 - 640.18w^2 + 6073 = 0$$

$$y^2 - 640.2y + 6072 = 0$$

$$\Delta = 385568$$

$$\sqrt{\Delta} = 621$$

$$\rightarrow w_1^2 = 10 \frac{rad^2}{s^2} \quad \rightarrow w_1 = 3.15 \text{ rad/s}$$

$$\rightarrow w_2^2 = 630 \frac{rad^2}{s^2} \quad \rightarrow w_2 = 25.1 \text{ rad/s}$$

$$T_1 = \frac{2\pi}{w_1} = 2s \quad \text{et} \quad T_2 = \frac{2\pi}{w_2} = 0.25s$$

NB : $T_1 = 2s$ indique que la periode du système avec isolation n'est pratiquement pas affecté par la flexibilité de la structure.

III-1-2. Modes propres $\{a_i\}$

$$[[K] - w_i^2[M]] \{a_i\} = 0$$

1^{er} mode : $w_1 = 3.15 \text{ rad/s}$:

$$(k + k_b - w_1^2 M_1) a_{11} - k a_{12} = 0$$

$$(263m - 10m) a_{11} - 246.5 a_{12} m = 0$$

$$a_{11} = 1.00 \quad \rightarrow 253m * 1 - 246.5m * a_{12} = 0$$

$$\rightarrow a_{12} = 1.03$$

$$\{a\}_1 = \begin{pmatrix} 1.00 \\ 1.03 \end{pmatrix}$$

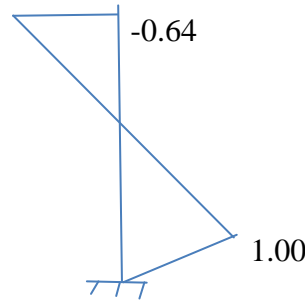
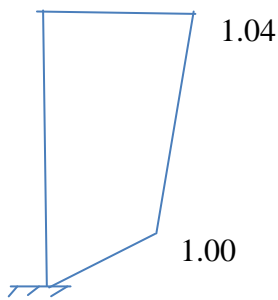
2^{eme} mode : $w_2 = 25.1 \text{ rad/s}$:

$$(263m - w_2^2 * \frac{2}{3}m) a_{21} - k a_{22} = 0$$

$$a_{21} = 1.00 \quad (263m - 630 * \frac{2}{3}m) * 1 - 246.5m a_{22} = 0$$

$$\rightarrow a_{22} = -0.64$$

$$\{a\}_2 = \begin{pmatrix} 1.00 \\ -0.64 \end{pmatrix}$$



1^{ère} mode ($T_1 = 2s$)

2^{ème} mode ($T_2 = 0.25s$)

III-2. Facteur de participation modale

$$n_1 = \frac{M_1 a_{11} + M_2 a_{12}}{M_1 a_{11}^2 + M_2 a_{12}^2} = \frac{2/3 * m * 1 + m * 1.04}{2/3 * m * 1^2 + m * 1.04^2} \approx 0.98$$

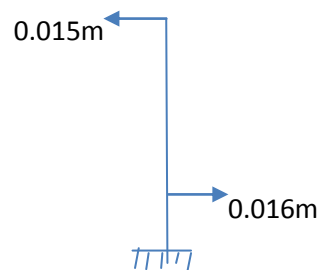
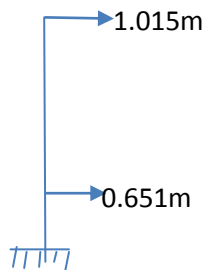
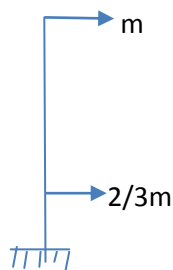
$$n_2 = \frac{M_1 a_{21} + M_2 a_{22}}{M_1 a_{21}^2 + M_2 a_{22}^2} = \frac{2/3 * m * 1 + m * (-0.64)}{2/3 * m * 1^2 + m * (-0.64)^2} \approx 0.025$$

III-3. Expansion modale des forces sismiques effectuent

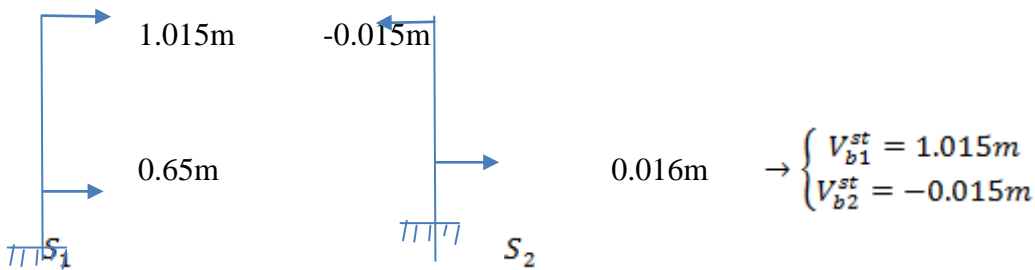
$$S_n = n_n [M] \{a\}_n$$

$$\rightarrow S_1 = n_1 [M] \{a\}_1 = 0.98 \begin{pmatrix} \frac{2}{3}m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.00 \\ 1.04 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.651m \\ 1.015m \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow S_2 = n_2 [M] \{a\}_2 = 0.025 \begin{pmatrix} \frac{2}{3}m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.00 \\ -0.64 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.016m \\ -0.015m \end{pmatrix}$$



III-4. Réponse statique modale



III-5. Facteur d'amortissement modal

$$\xi_n = \frac{c_n}{2M_n w_n} ; \begin{cases} M_n = \{a\}_n^T [M] \{a\} \\ C_n = \{a\}_n^T [C] \{a\} \end{cases} ; [C] = a_0 [M] + a_1 [K]$$

$$[C] = a_0 [M] + a_1 [K] ; 2\xi_i w_i = a_0 + a_1 w_i^2 \rightarrow \begin{cases} 2\xi_1 w_1 = a_0 + a_1 w_1^2 \\ 2\xi_2 w_2 = a_0 + a_1 w_2^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2 * 0.1 * 3.15 = a_0 + a_1 (3.15^2) \\ 2 * 0.02 * 25.1 = a_0 + a_1 (25.1^2) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a_1 \approx 0.0006 \approx 0 \\ a_0 \approx 0.63 \end{cases}$$

$$\rightarrow [C] = a_0 [M] = 0.63 \begin{pmatrix} \frac{2}{3}m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41m & 0 \\ 0 & 0.63m \end{bmatrix}$$

a) $\xi_1 = ?$

$$\xi_1 = \frac{c_1}{2M_1 w_1} ; C_1 = (1 \quad 1.041) \begin{pmatrix} 0.41m & 0 \\ 0 & 0.63m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1.041 \end{pmatrix} \approx 1.09m$$

$$M_1 = (1 \quad 1.041) \begin{pmatrix} \frac{2}{3}m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1.041 \end{pmatrix} \approx 1.75m$$

$$\xi_1 = \frac{1.09m}{2 * 1.75m * 3.15} = 0.97 \approx 9.7\%$$

b) $\xi_2 = ?$

De la même manière :

$$C_2 = 2.7m ; M_2 = 1.08m ; w_2 = 25.1 \text{ rad/s}$$

$$\xi_2 = \frac{2.7m}{2 * 1.08m * 25.1} = 0.5 \approx 5\%$$

III-6. Réponse au pseudo-accel ($\frac{s_a}{g}$) pour les 2 modes :

$$\begin{cases} T_1 \approx 2s \\ \xi_1 \approx 9.8\% \end{cases} \rightarrow \frac{s_a}{g} = 0.025$$

$$\begin{cases} T_2 \approx 0.25s \\ \xi_2 \approx 5\% \end{cases} \rightarrow \frac{s_a}{g} = 0.206$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{zone II}_b \\ \text{groupe 1A} \end{array} \right. \rightarrow A = 0.30; \text{ sol ferme } \left\{ \begin{array}{l} T_1 = 0.15 \text{ s} \\ T_2 = 0.4 \text{ s} \end{array} \right. ; \text{ portique autostable : } R=5 ; Q=1.1.$$

1^{er} mode T=2s :

$$T_2 \leq T \leq 3s \quad \frac{S_{a_1}}{g} = 2.5\eta (1.25A) \frac{Q}{R} \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\xi_1 = 10\% \quad \eta = \sqrt{\frac{7}{12}} = 0.75$$

$$\frac{Q}{R} = 0.22$$

$$\left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0.4}{2}\right)^{\frac{2}{3}} = 0.16$$

$$\frac{S_{a_1}}{g} = 0.206 * 0.75 * 0.16 = 0.025$$

2eme mode T=0.25s :

$$T_2 \leq T \leq T_2 \quad \frac{S_{a_2}}{g} = 2.5\eta (1.25A) \frac{Q}{R}$$

$$\xi_2 = 5\% \quad \eta = 1$$

$$\frac{Q}{R} = 0.22$$

$$\frac{S_{a_2}}{g} = 2.5 * 1 * 0.375 * 0.22 = 0.206$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{b_1}^{sr} = 1.015m \\ \frac{S_{a_1}}{g} = 0.025 \end{array} \right\} V_{b_1} = V_{b_1}^{sr} * \frac{S_{a_1}}{g} = 1.015m * 0.025 = 0.0254m$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{b_2}^{sr} = -0.015m \\ \frac{S_{a_2}}{g} = 0.206 \end{array} \right\} V_{b_2} = V_{b_2}^{sr} * \frac{S_{a_2}}{g} = -0.015m * 0.206 = -0.0031m$$

III-7.comparaison entre les 2 systemes (avec isolation et sans isolation)

III-7-1.Effort tranchant pour le système avec isolation

L'effort tranchant global est calculé en utilisant la méthode de combinaison modale **SRSS**

$$V_b^{SRSS} \sqrt{V_{b_1}^2 + V_{b_2}^2} = \sqrt{(0.0254m)^2 + (-0.0031m)^2}$$

$$\sqrt{V_{b_1}^2 + V_{b_2}^2} = 2.55 * 10^{-2}m$$

III-7-2.Effort tranchant pour le système sans isolation

$$T_f = 0.4s \quad T_1 \leq T_f \leq T_2$$

$$\xi_f = 2\% \quad \eta = 1.33$$

$$\frac{S_a}{g} = 2.5\eta (1.25A) \frac{Q}{R} = 0.274$$

$$V_b = mg \frac{S_a}{g} = 0.274mg$$

$$V_b^{SRSS} = mg \frac{S_a^{SRSS}}{g} = 0.0255mg$$

$$V_b^{SRSS} = \frac{5}{3} mg \frac{S_a^{SRSS}}{g} = \frac{5}{3} * 0.0255mg = 0.0425mg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_b}{mg} = 0.274 \\ \frac{V_b^{SRSS}}{mg} = 0.0425 \end{array} \right.$$

$$\frac{\left(\frac{V_b}{mg}\right) \text{ structure sans isolation}}{\left(\frac{V_b}{mg}\right) \text{ structure avec isolation}} = \frac{0.274}{0.0425} = 6.45$$

L'isolation réduit l'effort a la base plus de 6 fois

Conclusion et Perspectives

Conclusion et Perspectives

Conclusion

Cette étude qui a consisté à présenter la technique d'isolation à la base de manière simple, nous a permis de tirer les conclusions suivantes:

- Au lieu de penser à un dimensionnement parasismique, il vaut mieux attaquer le séisme à la base en réduisant son effet sur la structure.
- La technique d'isolation à la base est très efficace dans ce sens. Elle doit donc être encouragée dans notre pays qui est en retard dans ce domaine malgré les séismes dévastateurs qui le secouent de temps à autre.
- Malgré les grandes avancées dans certains pays tels que le Japon, cette nouvelle technique reste un domaine de recherche vierge tant sur le plan théorique que pratique.

Perspectives

Les applications numériques ont été faites sur un cas simple à un degré de liberté, elles pourraient être étendues à des systèmes plus complexes tels que les systèmes à plusieurs degrés de liberté.

Du point de vue pratique, des visites de chantier devraient être envisagées pour avoir une idée plus claire sur cette nouvelle technologie.

Lists des figures

- Figure I.1.** Bâtiment d'un tribunal en Angleterre traité ayant des isolateurs de base [2].
- Figure I.2.** Comportements des structures lors d'un séisme [5].
- Figure I.3.** Foothill Communities Law & Justice Center, California.
- Figure I.4.** Isolation parasismique-Schéma.
- Figure I.5.** La tour cristal de Kobé [4].
- Figure I.6.** Réhabilitation des structures à usa par des systèmes d'isolations [4].
- Figure I.7.** Aquila bâtiments du quartier et le système de pendule de frottement utilisés.
- Figure I.8.** Hôpital d'Erzurum [7].
- Figure I.9.** Plans architectural du projet [6].
- Figure I.10.** Installation des dispositifs parasismiques [6].
- Figure :** Zone d'habitation, région de Boumerdes, Algérie (AZZOUZ et al, 2005).
- Figure :** La carte de micro zonage Algérien. (C.G.S, 2004) [12].
- Fig. II.1 :** L'effet des appuis parasismiques.
- Fig. II.2 :** Les différents types d'appuis à déformation.
- Fig. II.3 :** Les différents types d'appuis à glissement.
- Fig. II.4 :** Appui à déformation et glissement.
- Fig. II.5 :** Appuis à roulements.
- Fig. II.6 :** Les différents types d'amortisseurs hystérétiques.
- Fig. II.7 :** Les différents types d'amortisseurs visqueux.
- Fig. II.8 :** Amortisseurs à frottement.
- Fig.II.9 :** Paramètres d'une structure à deux degrés de liberté.
- Fig.II.10 :** Modèle mathématique.
- Fig.II.11 :** La forme des modes propres de la structure isolée (2 ddl).
- Fig. II.12 :** Les conditions de voisinage.
- Fig. II.13 :** Emplacement des appuis parasismiques.
- Fig. II.14 :** Vue en plan des différentes positions possibles.
- Fig. II.15 :** Fondation à plusieurs niveaux.
- Fig. II.16 :** Mise en œuvre.

Symboles

ks : Rigidité de la structure.

cs : Amortissement de la structure.

kb : Rigidité de système d'isolation.

cb : Amortissement de système d'isolation.

us : Déplacement absolu de la structure.

ug : Déplacement au sol.

m : Masse de la structure.

mb : Masse de système d'isolation.

M : Masse de l'ensemble structure et système d'isolation.

ω_b : Fréquence propre de système d'isolation.

ω_s : Fréquence propre de la structure.

vb : Déplacement relatif de système d'isolation.

vs : Déplacement relatif de la structure.

β_b : Facteur d'amortissement de système d'isolation.

β_s : Facteur d'amortissement de la structure.

q_1, q_2 : Coefficients modaux dépendant du temps.

ϕ_{b1} : Premier mode propre de système d'isolation.

ϕ_{b2} : Deuxième mode propre de système d'isolation.

ϕ_{s1} : Premier mode propre de la structure.

ϕ_{s2} : Deuxième mode propre de la structure.

M_i : Masse généralisée.

λ_1, λ_2 : Coefficient de couplage.

SD : Spectre de déplacement.

CS : Coefficient de cisaillement.

ω : Fréquence propre.

β : Facteur d'amortissement.

$(vs)_{max}$: Déplacement maximum de la structure.

$(vb)_{max}$: Déplacement maximum de système d'isolation.

SA : Spectre d'accélération.

u, \dot{u}, \ddot{u} : Vecteurs des déplacements, vitesses et accélérations des degrés de liberté à la base.

$K1$: Rigidité élastique.

$K2$: Rigidité post élastique.

T : Période effective.

g : Accélération de la pesanteur.

Vb : Force sismique.

Vs : Force du cisaillement minimale.

η : Facteur de participation modale

ξ_n : Facteur d'amortissement modale

M : Matrice de masse globale de la structure.

C : Matrice d'amortissement de la structure.

K : Matrice de rigidité de la structure.

Référence :

- [1] **Benzina.F** Contribution a l'étude des structures intelligentes. Tlemcen. Mémoire de magistère en génie civil, Université abou bekr belkaid, 2013.
- [2] **Benayad.K** Comportement dynamique des ouvrages sur isolateurs de base. Tlemcen : Mémoire de Magister en génie civil, Université Abou Bakr Belkaid , 2013. p. 101.
- [3] **Djellouli. L** Modélisation de système d'isolation parasismique pour le control de la réponse dynamique des structures. Biskra. Mémoire de Magister en génie civil, Université Mohamed Khider, 2012. p. 151.
- [4] **Martelli, A.** MODERN SEISMIC PROTECTION SYSTEMS FOR CIVIL AND INDUSTRIAL STRUCTURES. Synthesis of the application to Thessaloniki city, SAMCO Final Report, 2006.
- [5] **Michael D.** SEISMIC PROTECTIVE SYSTEMS SEISMIC ISOLATION. Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples, Polytechnic Institute.
- [6] **Entp.** LA CONSTRUCTION SUR BASES ISOLEES L'EXPERIENCE ALGERIENNE. ALGER : Ecole Nationale des Travaux Publics.
- [7] **Bogdan.P, Pasca.S, Muresan.I** SEISMIC ISOLATING SYSTEMS CLASSIFICATION, PROPERTIES AND UTILIZATION. Technical University of Cluj-Napoca Faculty of Civil Engineering, June 21, 2011.
- [8] **Hamoudi.M** An Innovative Isolation Device For Aseismic Design. Technical University of Catalonia, School of Civil Engineering, Department of Applied Mathematics III, septembre 2009.
- [9] **HCCI/Croix Rouge française**, commission crises, prévention des crises et reconstruction, Juil. 2004.
- [10] **MORAND-DEVILLER J. doc.** « La ville durable » Université PANTHEON-Sorbonne, Paris I, France, 2003.
- [11] **O.N.S** (Office National des Statistiques) Croissance démographique de la Wilaya d'Alger,98.
- [12] **C.G.S** (Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique) « Règles parasismiques Algériennes, RPA.99, Document Technique Réglementaire, Edit. Office des Publications Universitaires, Alger, Algérie, 2004, 19 p. p.10.
- [13] **Abderrahim LASSOUANI** CARTOGRAPHIE DE L'ALEA SISMIQUE APPLICATION A LA COMMUNE DE BENSEKRANE,mémoire de magister en geologie, Université Abou Bakr Belkaid , 2007.
- [14] **Melle MEGHOUCHE Djedjiga**, Effet des conditions de contact sur la réponse dynamique des structures ,mémoire de magister en génie civil, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.
- [15] **BENCHARIF Raouf et TERCHI Brahim**, Contribution des appuis parasismiques dans la réduction des effets sismiques sur les bâtiments, mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale des Travaux Publics.
- [16] **Anil K.Chopra** de l'université de Berkeley en Californie dans son excellent ouvrage : 'dynamics of structurs theory and applications to earthquake engineering' chapitre 20,pp :686-694.