

I-1- Introduction

Les méthodes innovantes de contrôle sont devenues dans les dernières années d'actualité importante, elles permettent de projeter des structures pour résister sans dégâts importants à des actions dynamiques, par exemple des tempêtes, une grande action sismique, etc. Parallèlement, on exige pendant la construction de protéger les structures par des systèmes de protection efficaces et fiables en réduisant la réponse sismique. Parmi ces méthodes innovantes de contrôle, on peut distinguer trois approches différentes : le système de contrôle passif, semi-actif et actif, à celles-ci on peut ajouter une quatrième qui est le système de contrôle hybride.

Le système de contrôle passif consiste à superposer à la structure un dispositif qui modifie la rigidité ou l'amortissement du système structural sans demande d'une source d'énergie externe et sans introduire de l'énergie pour son fonctionnement. Le système contrôle actif vise à imposer une force ou un déplacement en certains points du système à contrôler, en fonction notamment de l'état mesuré ou de l'historique de celui-ci. Ce type de contrôle nécessite une source importante d'énergie externe pour opérer les actionneurs qui fournissent les forces de contrôle dont les magnitudes sont déterminées en utilisant les mesures, à partir des capteurs, des excitations et/ou de réponse de la structure. Le système de contrôle semi-actif combine les principaux traits des systèmes actifs et passifs. Ce système exige une faible source d'énergie pour modifier la propriété mécanique de dispositif de contrôle. Alors, qu'un système de contrôle est hybride s'il utilise une combinaison entre les avantages des systèmes de contrôle passif et actif [02].

I-2- Système de contrôle passif

Les systèmes de contrôle passif isolent la base d'un bâtiment ou dissipent l'énergie issue du sol grâce à leurs propriétés dynamiques et mécaniques intrinsèques de l'isolateur seulement, couplés à la structure de telle façon que les vibrations de la structure soient amorties passivement. Ces systèmes sont en général peu coûteux relativement aux autres systèmes de contrôle, le coût additionnel est de 5 à 10% par rapport au prix de l'ouvrage pour les systèmes de contrôles passifs ; ils sont faciles d'utilisation et permettent de réduire considérablement la réponse du bâtiment aux sollicitations extérieures. Le type d'isolation passif ne nécessite aucune intervention extérieure énergétique lorsque la structure est sollicitée [03], [11].

I-2-1- Contrôle passif avec isolateurs à la base

Les isolateurs à la base sont des dispositifs caractérisés par une grande souplesse horizontale et une rigidité verticale, ils sont placés entre les fondations et la superstructure pour dissiper le maximum d'énergie.

Il existe plusieurs types d'isolateurs à la base. Certains ont été déjà utilisés, d'autres sont restés au stade d'études théoriques ou d'essais. Parmi ces catégories et selon leur mode de fonctionnement on peut citer [41], [03] :

I-2-1-1- Appuis à déformation

Les appuis à déformation utilisés pour isoler les constructions des vibrations sont analogues aux appuis couramment utilisés pour les ponts et ils ont toujours montré un comportement satisfaisant. Ils sont en général constitués de couches d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (néoprène) alternées et séparées par des frettes en acier.

Les frettes métalliques confèrent aux appuis une grande rigidité verticale et permettent de supporter la charge verticale tandis que l'élastomère se déforme en cisaillement horizontal et assure l'isolation de la structure. Ces appareils d'appuis sont flexibles et permettent d'obtenir une grande souplesse vis-à-vis des efforts horizontaux agissant sur le bâtiment car le comportement est viscoélastique. Évidemment, différents types d'élastomère peuvent être employés avec des caractéristiques visqueuses plus ou moins élevées. Une étude numérique est généralement réalisée pour déterminer la meilleure configuration pour chaque application.

Le seul inconvénient de cet appui est qu'il possède par nature une période fondamentale élevée, or dans le cas de séisme à très basse fréquence ou en présence de sols mous, ce type d'isolateur est susceptible de rentrer en résonance, ce qui n'est pas souhaitable.

On distingue différents types d'appuis à déformation tels que les appuis en caoutchouc fretté (figure 01) et les appuis en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb (la Figure 02).

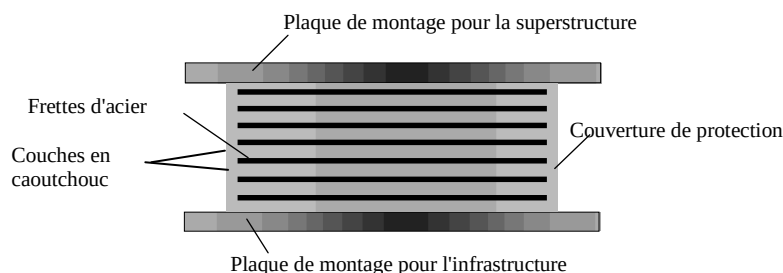


Figure 01 : Appui en caoutchouc fretté

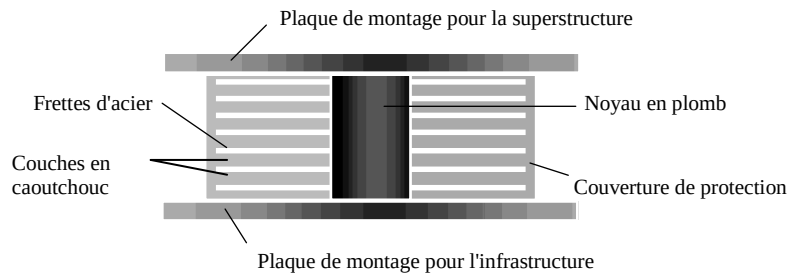


Figure 02 : Appui en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb

I-2-1-2- Appuis à glissement

Le système d'appuis à glissement est constitué d'une part de plaques solidaires de la superstructure et d'autre part de plaques fixées aux fondations. Leur interface constitue le plan de glissement et le matériau des deux séries de plaques n'est pas nécessairement le même.

Ces systèmes permettent le découplage des mouvements horizontaux et verticaux de la superstructure de ceux des éléments de fondations qui sont dûs à la différence importante des fréquences d'oscillation dans les deux directions. La réponse à l'excitation sismique d'une structure reposant sur des plaques de glissement ne dépend que de sa masse et du coefficient de frottement entre les plaques.

Parmi ces appuis, on peut citer :

I-2-1-2-1- Appuis à friction

Cet appui présenté en figure 03 est constitué d'une interface en acier inoxydable superposée sur le téflon. Le comportement est purement plastique car si le coefficient de friction est faible (environ 10%), il assure une grande flexibilité et donc une réduction sensible des sollicitations sismiques subies par les structures. L'acier inoxydable est généralement poli et le téflon peut être renforcé de fibres de verre ou de carbone. Aucune force de rappel n'est assurée.



Figure 03 : Appui à friction

I-2-1-2-2- Appuis à pendule glissant

Cet appui présenté à la figure 04 a été développé à l'Université de Californie à Berkeley, en Californie. Une réduction sensible des sollicitations sismiques est assurée par glissement des interfaces. Une force de recentrage est activée par gravité grâce à la concavité de la

surface de glissement (portion d'une sphère) lorsque la rotule glissante s'écarte du centre géométrique de l'isolateur qui confère à la structure un mouvement global similaire à une pendule. Cet isolateur a en plus l'avantage d'être assez compact car il est d'une faible épaisseur comparé à un appui d'élastomère. Il est cependant susceptible de recevoir des chocs si le déplacement réel dépasse le déplacement de calcul de l'appui.

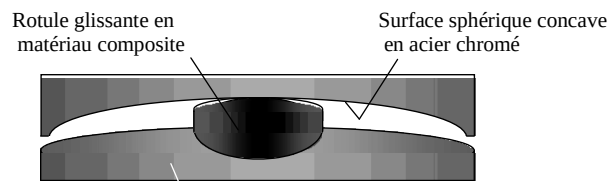


Figure 04 : Appuis à pendule glissant

I-2-1-3- Appuis à déformation et glissement

Ce système d'appuis résulte de l'association de plaques de glissement et des appuis à déformation. Cette association supprime l'inconvénient pour ces derniers en cas de sols mous. Dans un premier temps, le système se déforme 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 ce système de protection sismique est très efficace, il peut produire plusieurs glissements.

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

Parmi ces appuis, on peut citer:

I-2-1-3-1- Appui utilisé par l'EDF (Electricité de France)

Cet appui est une combinaison d'une interface de téflon-acier inoxydable montée en série sur un appui élastomère, tel que représentée à la figure 05.

L'inconvénient de ce système d'appui est qu'il n'assure pas de force de recentrage pour les efforts élevés. Pour les efforts de vent, l'élastomère assure une bonne stabilité de l'appui. Il limite les efforts dans la structure, c'est pourquoi il a été adopté par Electricité de France pour l'isolation des centrales nucléaires.

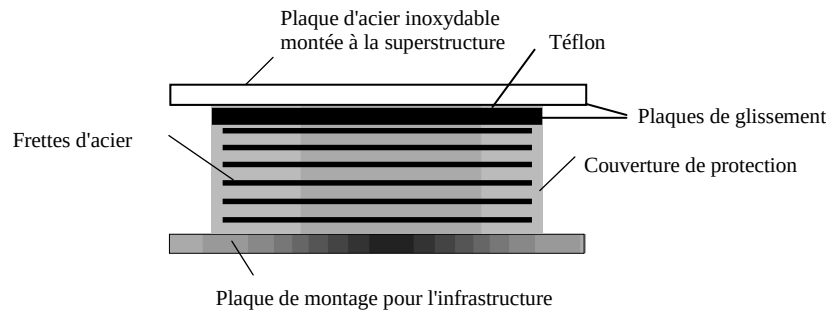


Figure 05 : Appui utilisé par l'EDF

I-2-1-3-2- Appui proposé par N.Mostaghel

Un autre type d'appui à déformation et glissement a été conçu et testé. Il est composé de disques en acier inoxydable superposés, pouvant glisser les uns sur les autres (figure 06). Les disques sont recouverts de Téflon afin de diminuer le coefficient de frottement et reliés par un noyau central ou plusieurs noyaux en caoutchouc. Les noyaux sont librement insérés dans l'appui. Leur seul rôle est de distribuer les glissements sur la hauteur de l'isolateur et ils ne portent donc aucune charge verticale.

Une enveloppe en caoutchouc protège les disques contre la poussière et les agents atmosphériques. Le frottement entre les disques empêche les glissements sous l'effet du vent ou des séismes de faible intensité. Lorsque les secousses du sol engendrent des charges horizontales supérieures au coefficient de frottement, des glissements se produisent, provoquant la déformation de l'appui. Les déplacements et la vitesse de la superstructure varient peu avec la période d'oscillation, ce qui signifie que la sensibilité du système au contenu fréquentiel du séisme est très faible. Par ailleurs, la vitesse de glissement peut être réduite en augmentant le nombre de plaques [41].

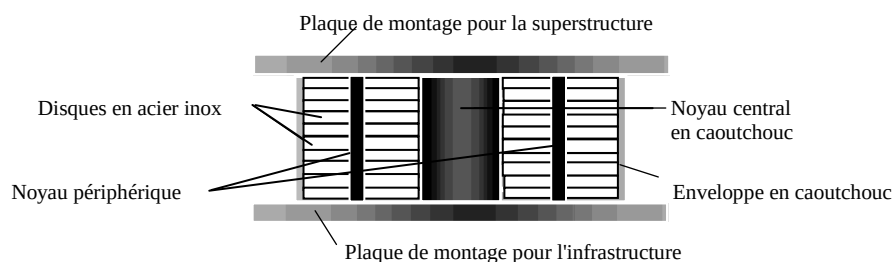


Figure 06 : Appui proposé par N.Mostaghel.

I-2-1-4- Appuis à roulement

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 présentent.

Pour permettre des mouvements dans deux directions, on utilise des billes sphériques ou deux couches orthogonales de rouleaux cylindriques (figure 07). Lors de chaque déplacement, les ovoïdes entraînent un léger soulèvement de la construction qui a alors tendance à revenir à sa position initiale. Un dispositif de blocage vis-à-vis de l'action du vent ainsi que des amortisseurs parasismiques peuvent être prévus.

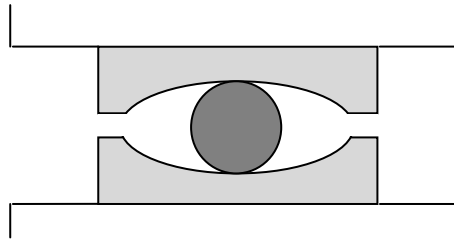


Figure 07 : Appui à billes

I-2-2- Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie

Les systèmes de contrôle passif avec dissipateurs d'énergie ont le même principe de base que les isolateurs sismiques lorsqu'ils sont incorporés dans la structure. Ils peuvent absorber une portion de l'énergie d'excitation extérieure. En plus, ils peuvent réduire substantiellement le mouvement différentiel entre les éléments de la structure et par conséquent réduire les dégâts de cette dernière. Ces dernières années, de sérieux efforts ont amélioré le concept des systèmes de dissipation d'énergie, et plusieurs appareils ont été installés dans des structures partout dans le monde. En général, ils sont caractérisés par leur capacité de dissiper l'énergie de vibration de la structure ou de la convertir en un autre mode de vibration ou en une autre forme d'énergie [02], [13] et [33]. Les principaux systèmes sont :

I-2-2-1- Amortisseurs métalliques

C'est l'un des mécanismes les plus efficaces disponibles pour la dissipation de l'énergie entrée à une structure pendant un séisme. En structures métalliques traditionnelles, la conception parasismique dépend de la ductilité des pièces de charpente pour absorber l'énergie sismique. L'idée d'employer les amortisseurs hystérétiques métalliques dans une structure pour absorber une grande partie de l'énergie sismique a commencé par le travail conceptuel et expérimental de Kelly et al (1972) [19] et Skinner et al (1975) [31]. Plusieurs

dispositifs amortisseurs hystérétiques métalliques considérés par ces chercheurs ont inclus la poutre de torsion, poutre de flexion, la bande-U comme illustré dans la figure 08 et l'appui en caoutchouc fretté avec amortisseur en barreau de plomb représenté en figure 02. Ce sont des pièces réalisées en matériaux très ductiles tels que l'acier doux, plomb, alliage malléables, etc. La dissipation d'énergie est obtenue à travers les déformations plastiques auxquelles ils sont soumis lors des déplacements relatifs de la superstructure et des fondations.

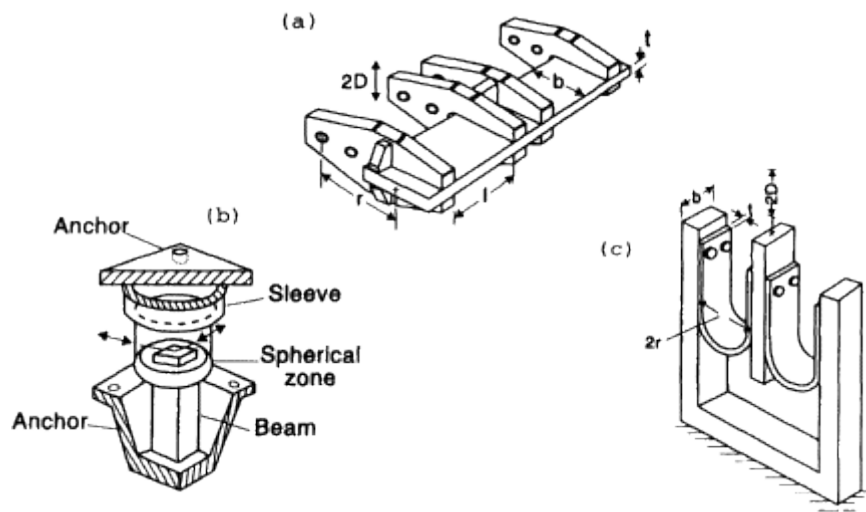


Figure 08 : Dispositifs amortisseurs métalliques proposés par Skinner et al (1975)

a) poutre de torsion, b) poutre de flexion, c) la bande-U

Des progrès considérables ont été accomplis dans le développement des amortisseurs métalliques, tels que les amortisseurs de la forme-X et des plaques triangulaires affichés en figure 09.

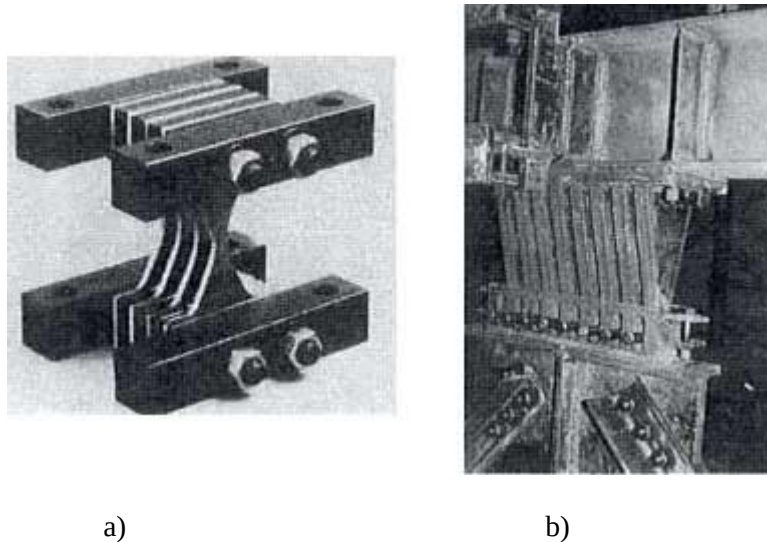


Figure 09 : Dispositifs amortisseurs métalliques

a) amortisseur de la forme-X.

b) amortisseur en plaques triangulaires.

De nombreuses investigations expérimentales ont été conduites pour déterminer les caractéristiques du fonctionnement de différentes structures de dispositifs. En raison de ce programme de recherche continu, plusieurs produits ont été développés et mis en application.

I-2-2-2- Amortisseurs à frottement

Le frottement est un mécanisme efficace, fiable, économique, et largement appliqué, le principe de ces amortisseurs repose sur le phénomène de dissipation de l'énergie par friction qui apparaît sur les boucles d'hystérésis du diagramme efforts-déformations, qui peuvent être rectangulaires. Pour réaliser ce mécanisme de frottement, l'amortisseur comprend une série de plaques fixées les unes aux autres par des boulons en acier à haute résistance et spécialement traitées pour produire un degré de friction maximal.

Au début des années 80, Pall et Marsh ont commencé le développement des amortisseurs de friction passifs pour améliorer la réaction sismique des structures sur la base du modèle des freins à friction. Depuis ces années, des progrès considérables ont été accomplis dans les dispositifs de frottement, et leur comportement a été étudié analytiquement et expérimentalement. La figure 10 montre plusieurs types de dispositifs de frottement développés à travers le monde.

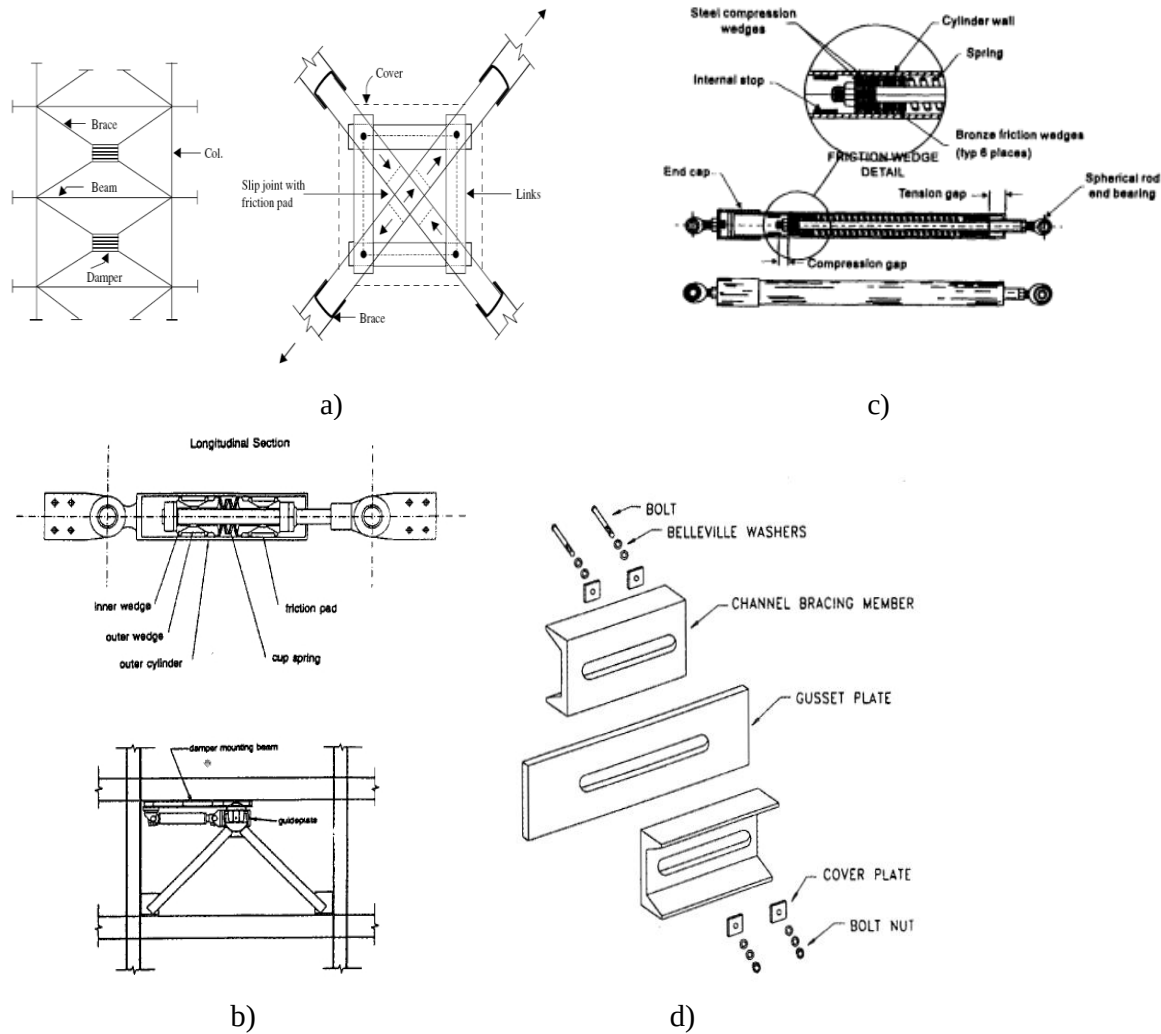


Figure 10 : Dispositifs amortisseurs à frottement.

- a) amortisseur à frottement proposé par Pall et Marsh (1982) [27].
- b) amortisseur à frottement de Sumitomo Aiken et Kelly J.M (1990) [01].
- c) amortisseur de EDR (Energy Dissipating Restraint) Nims et al (1993) [25].
- d) amortisseur de SBC (Slotted Bolted Connection) Fitzgerald et al (1989) [12].

I-2-2-3- Amortisseurs viscoélastiques (VE)

Les amortisseurs viscoélastiques se composent des matériaux viscoélastiques VE de grands amortissements tels que le caoutchouc, les polymères, et les substances vitreuses pour dissiper et absorber l'énergie par la déformation de cisaillement. Un amortisseur VE typique contient des couches de matériaux VE sur des plaques métalliques suivant les indications de la (figure 11a). Des composants d'amortisseurs VE sont montés sur une structure comme une partie de la membrure (figure 11b) et sur un système des diagonales de contreventement (figure 11c). La déformation de cisaillement se produit et l'énergie est absorbée quand la vibration structurale induit le mouvement relatif entre les ailes horizontales des plaques métalliques externes et la plaque centrale [13].

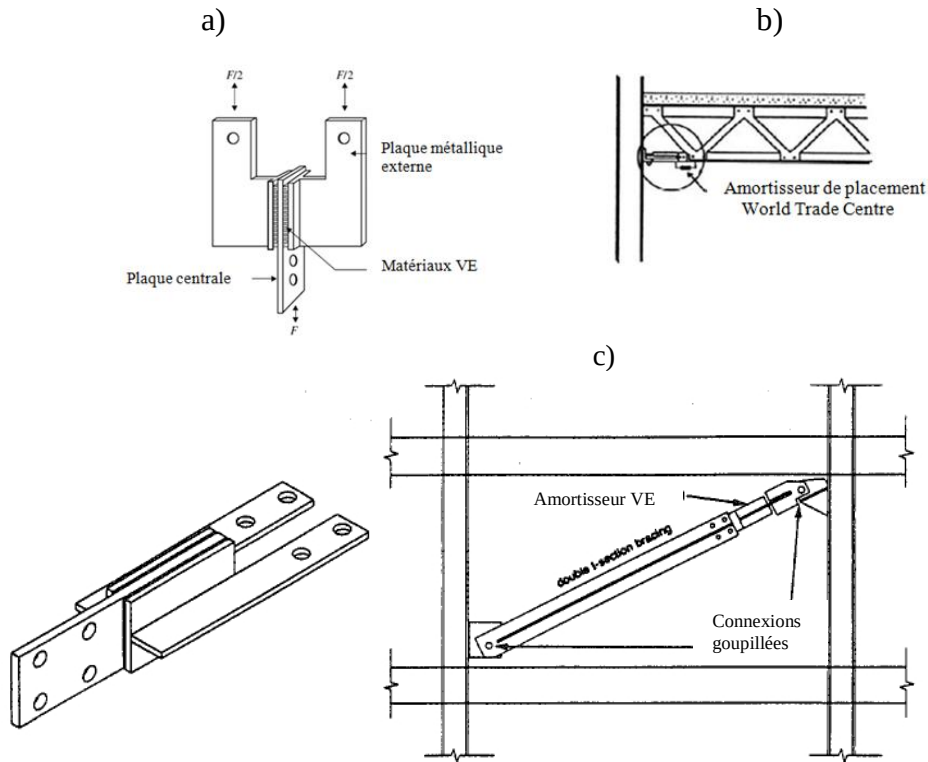


Figure 11 : Dispositifs des amortisseurs viscoélastiques VE :

- a) détail d'un amortisseur VE.
- b) la connexion de l'amortisseur VE à la membrure.
- c) la connexion de l'amortisseur VE à la diagonale de contreventement.

I-2-2-4- Amortisseurs fluides visqueux

Les amortisseurs métalliques, frottements et amortisseurs VE utilisent l'action des solides pour améliorer la performance des structures soumises aux excitations environnementales. L'utilisation du fluide visqueux pour la réduction de choc et de vibration est bien connue à l'industrie lourde et militaire.

Dans les années 70, la première mise en place complète des amortisseurs fluides visqueux a été faite pour des ponts en Italie [33]. Dans les années 80, des efforts importants ont été faits pour développer cette technologie industrielle pour les structures de génie civil. Ces efforts ont mené au développement, l'analyse et la modélisation, le test et la mise en place complète des amortisseurs fluides visqueux.

Le concept des amortisseurs fluides visqueux est montré en figure 12.

Une conception simple est réalisée avec dashpot classique, et la dissipation se produit en convertissant l'énergie cinétique en chaleur pendant que le piston se déplace et déforme un fluide épais et très visqueux. Cet amortisseur liquide visqueux (figure 12a) a été fabriqué pour la première fois par le contrôle de vibration de GERB et utilisé comme composant des

systèmes sismiques avec isolateurs à la base [15]. Le mouvement relatif d'un amortisseur piston dans l'amortisseur du boîtier provoque le fluide visqueux pour entrer et sortir dans les deux sens à travers l'orifice, et l'énergie est absorbée par le frottement entre le fluide visqueux et l'orifice.

Le concept employé dans la superstructure apparaît dans la conception alternative du mur d'amortissement visqueux VDW (figure 12b) ; il a été élaboré par l'entreprise de construction Japonaise Sumitomo [13], le piston est simplement une plaque métallique provoquée pour se déplacer dans son plan dans un récipient rectangulaire métallique étroit qui est rempli de fluide visqueux. Pour installer un VDW, le piston est fixé au plancher supérieur, et le récipient est fixé au plancher inférieur. Le mouvement des planchers déforme le fluide, ainsi le frottement entre la plaque intérieure et le fluide visqueux absorbe l'énergie.

Semblable aux amortisseurs VE, les amortisseurs fluides visqueux se comportent linéairement avec la température et sont liés à la fréquence. Des joints de haute résistance sont exigés pour empêcher le fluide visqueux de s'enfuir. Le coût de cet amortissement est relativement bas et son efficacité est haute.

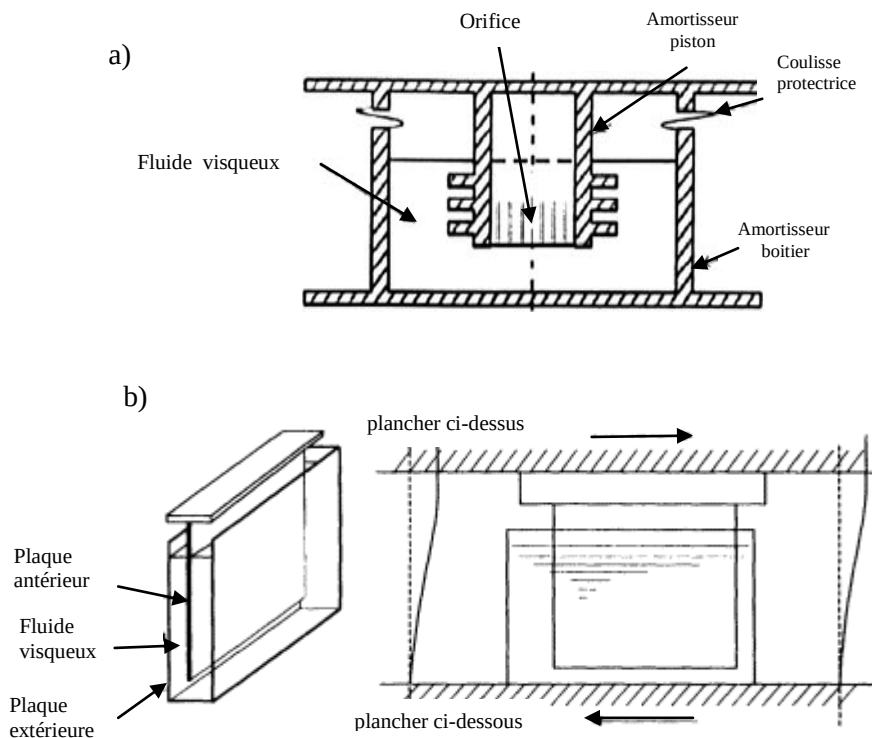


Figure 12 : Dispositifs amortisseurs fluide visqueux :

a) amortisseur fluide visqueux de GERB.

b) mur d'amortissement visqueux VDW.

I-2-3- Contrôle passif avec systèmes inertiels couplés

Un contrôle passif avec des systèmes inertiels couplés consiste en une masse solide ou liquide située à l'un des étages les plus élevés du bâtiment et lié à celui-ci via un ressort et un mécanisme d'amortissement (visqueux ou viscoélastique). L'inertie crée par le mouvement de cette masse couplée avec l'inertie de la structure ou bâtiment pour réduire les vibrations induites par le séisme. Le mouvement de la masse s'effectue dans le sens opposé à celui de l'immeuble et avec la même fréquence. Ainsi, situé au plus haut de la construction, le mouvement pendulaire amortit la déformation et limite les dommages sur la structure.

On distingue deux types de contrôle passif avec systèmes inertiels couplés, le premier est l'amortisseur de masse accordé TMD (Tuned Mass Damper) et le deuxième l'amortisseur liquide accordé TLD (Tuned Liquid Damper).

I-2-3-1- Amortisseur de masse accordée TMD :

Les amortisseurs de masse accordée, sous leur forme la plus simple, se composent d'un système auxiliaire de masse (m_d), ressort (k_d) et amortisseur (c_d) ancré ou fixé à la structure principale. Habituellement au dessus de la structure, suivant les indications de la figure 13. Le mécanisme de base d'un TMD est un amortisseur de vibration dynamique, comme indiqué par la figure 14. L'amortisseur se compose d'une petite masse m_d et un ressort de rigidité k_d est fixé à la masse principale M avec un ressort de rigidité K . Sous un chargement harmonique simple $P_0 \sin \omega t$, la masse principale reste stationnaire quand la fréquence naturelle de l'amortisseur est égale à la fréquence d'excitation c-à-d.

$$\omega_n = \omega_d = \sqrt{k_d/m_d} \quad [09].$$

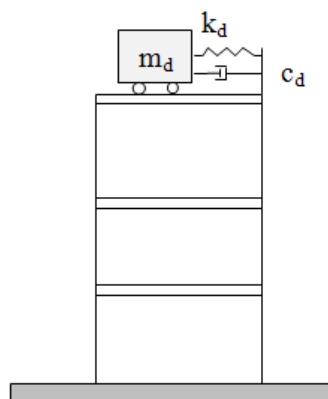


Figure 13 : Amortisseur de masse accordée installé sur la structure

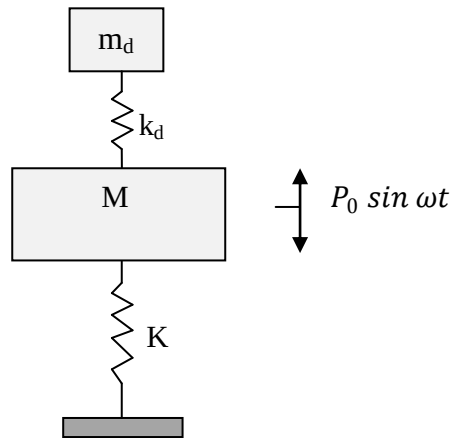


Figure 14 : Amortisseur de vibration dynamique

Cette force d'excitation externe $P_0 \sin \omega t$ sur la masse principale M peut être équilibrée par la force de restitution de la petite masse m_d .

La capacité du système qui absorbe l'énergie de vibration dépend du rapport de masse du TMD à la structure principale (entre 1/300 et 1/100, la réduction des oscillations est de 1/3) [03], au rapport de rigidité (k_d/K), au rapport de la fréquence naturelle du TMD à la structure, et aux constantes d'amortissement du TMD et de la structure [11],[13].

L'effet d'un TMD peut être visualisé par le changement de la constante d'amortissement de la structure elle-même en plus grande valeur. Pour des réponses des structures légèrement atténuées avec un mode dominant, le TMD peut effectivement réduire la réponse maximale. Bien que les TMD sont de plus en plus utilisés pour les structures sensibles au vent ou mouvement excessif des bâtiments pour assurer le confort d'exploitation.

La figure (15) montre quelques exemples de TMD disponibles pour la mise en place pratique. La force de restitution peut être produite par le chargement de poids du TMD (types a, b, d, et e), par un ressort (types c, d, et f), ou par un appui (types g et h). La force d'amortissement peut être réalisée par un amortisseur (types b, c, d, et f) ou par HDRB appui en caoutchouc à haute dissipation d'énergie (type h). Pour le TMD du type pendule (types a et b), la période de vibration T dépend seulement de la longueur L du bras de pendule ($T = 2\pi \sqrt{L/g}$). L'accord de la fréquence de TMD au mode fondamental de structure exige souvent un très grand espace pour le bras de pendule. Pour sauvegarder l'espace nécessaire, ce pendule simple est modifié de telle manière que la période de pendule dépende de la longueur de bras de pendule et des autres propriétés. Par exemple, le bras de pendule peut être connecté à un ressort (le type c), un amortisseur à deux masses (type d), ou le pendule à plusieurs étages (le type e) peut être utilisé avec des suspentes

tournantes qui réduisent l'espace vertical requis et gardent le même espace horizontal occupé.

L'application de TMD est encore limitée par trois facteurs. Le premier, les TMD sont pertinents seulement pour un mode, moins adaptés au contrôle de réponse sismique. Le deuxième, ils sont sensibles aux défauts de la mise en place. et le troisième, ils occupent un espace relativement grand.

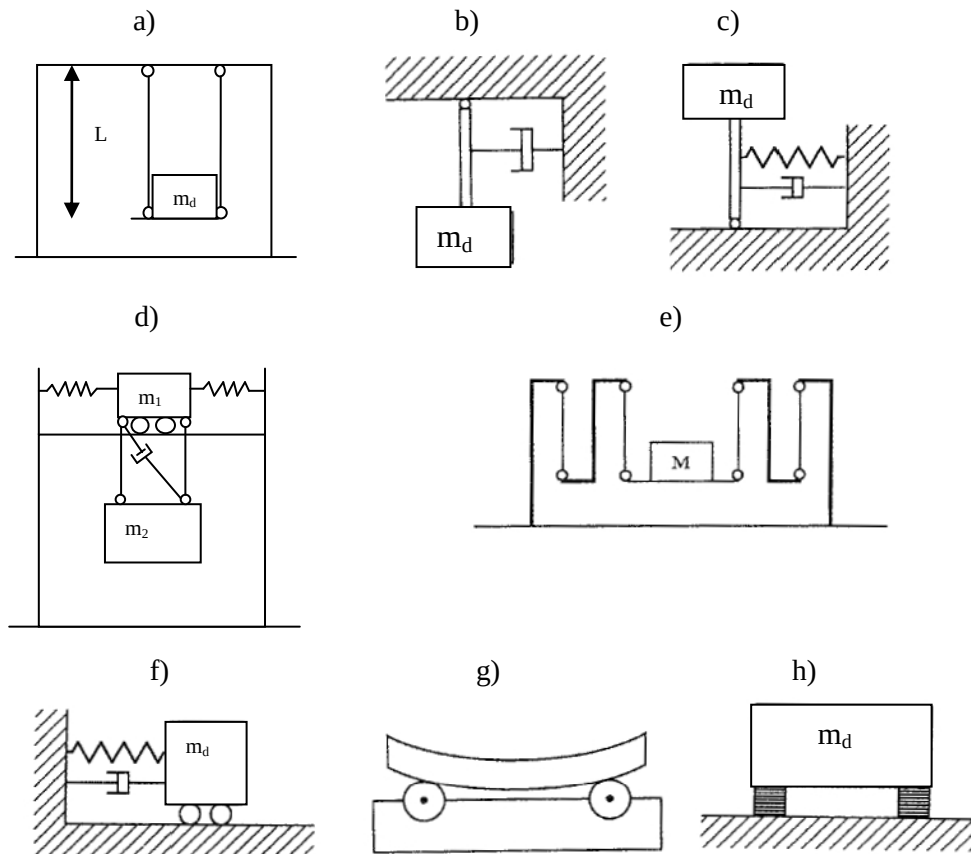


Figure 15 : Les types du TMD :

a) pendule simple, b) pendule avec amortisseur, c) pendule inversé avec amortisseur et ressort, d) amortisseur à deux-masse, e) amortisseur à plusieurs étages, f) glissant la masse avec ressort et amortisseur, g) la masse basculant sur des appuis de rotation, et h) la masse sur des appuis en caoutchouc

I-2-3-2- Amortisseur liquide accordé TLD

le TLD est un autre type d'amortisseur dynamique pour absorber la vibration structurale, cet amortisseur a été employé couramment dans les bateaux et mis en application pour le contrôle de vibration des structures dans les années 80. Dans le TLD l'eau ou un autre liquide assure le mouvement de la masse, et la force de restitution est produite par gravitation. Les secousses de la vibration structurale induisent le mouvement de liquide à

l'intérieur du récipient, la turbulence de l'écoulement de liquide et le frottement entre le liquide et le récipient convertissent l'énergie dynamique du flux de fluide en chaleur, ainsi l'énergie de vibration structurale est absorbée.

Le principe de base du TLD et TMD est le même pour absorber l'énergie de vibration avec les mêmes mécanismes simples.

Le TLD peut être divisé en deux types. Le premier est l'amortisseur trempé suivant les indications de la figure 16a. La fréquence naturelle de vibration est réglée et rectifiée selon la taille du récipient ou la profondeur du liquide et la capacité d'amortissement est augmentée en mettant des mailles ou des tiges dans le liquide. La seconde est l'amortisseur liquide accordé de colonne suivant les indications de la figure 16b. La fréquence naturelle de vibration est réglée par la forme de colonne ou de pression atmosphérique dans la colonne et la capacité d'amortissement est augmentée par réglage de l'orifice dans la colonne qui produit de la turbulence élevée.

Semblable aux TMD, les TLD ont été utilisés pour absorber les vibrations des grandes structures, telles que les tours d'aéroport et les hauts édifices [36].

Les TLD ont deux avantages :

- Un TLD simple peut être pertinent dans n'importe quelle direction des vibrations transversales.
- L'eau utilisée pour le TLD peut servir en tant qu'élément de protection contre les incendies du bâtiment.

Les TLD ont deux propriétés défavorables:

- Ils n'exigent pas beaucoup d'espace parce que les liquides ont moins de densité de masse par rapport aux matériaux de TMD, tel que le béton ou l'acier.
- Les TLD ont également une réponse fortement non linéaire due au liquide, cette non linéarité complique le processus d'analyse et de conception pour les systèmes de TLD.

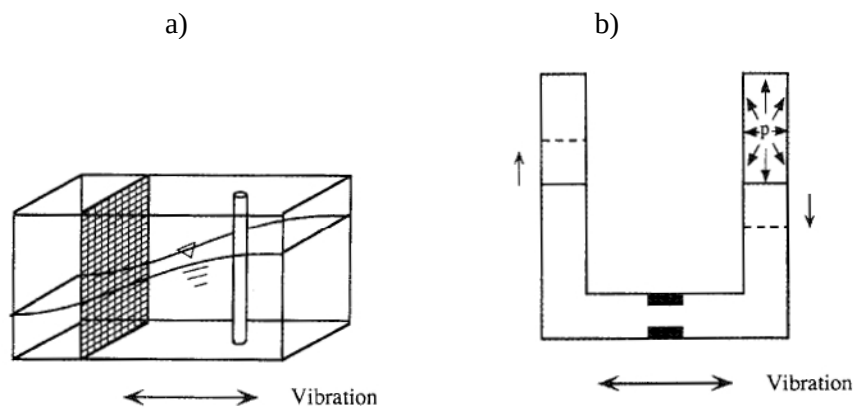


Figure 16: Les types du TLD :

- a) amortisseur trempé avec des mailles et des tiges
b) amortisseur de colonne avec orifice

I-3- Système de contrôle actif

Un contrôle passif est fondamentalement conçu pour réduire seulement un mode de vibration particulier de la structure. En revanche, un contrôle actif peut amortir une large bande de fréquence. L'étude du contrôle actif des structures est une extension logique de technologie de contrôle passif. Un système de contrôle est actif si un ou plusieurs actionneurs appliquent des forces sur une structure en utilisant une source d'énergie externe. Ces forces peuvent être utilisées pour ajouter ou dissiper l'énergie de la structure à contrôler. Afin de construire un tel système, il existe deux approches qui sont radicalement différentes : la première consiste à identifier la perturbation qui crée les vibrations pour l'annuler en lui superposant une excitation inverse. Cette stratégie de contrôle actif est appelée contrôle par anticipation (feedforward). La deuxième consiste à identifier la réponse de la structure plutôt que l'excitation qui la fait vibrer. Elle nécessite, donc, la modélisation du comportement dynamique de la structure. Le travail de contrôle des vibrations qui porte sur ce type de stratégie est appelé contrôle par boucle de rétroaction (feedback).

Un système de contrôle actif des structures a la configuration de base comme indiquée dans la figure (17).

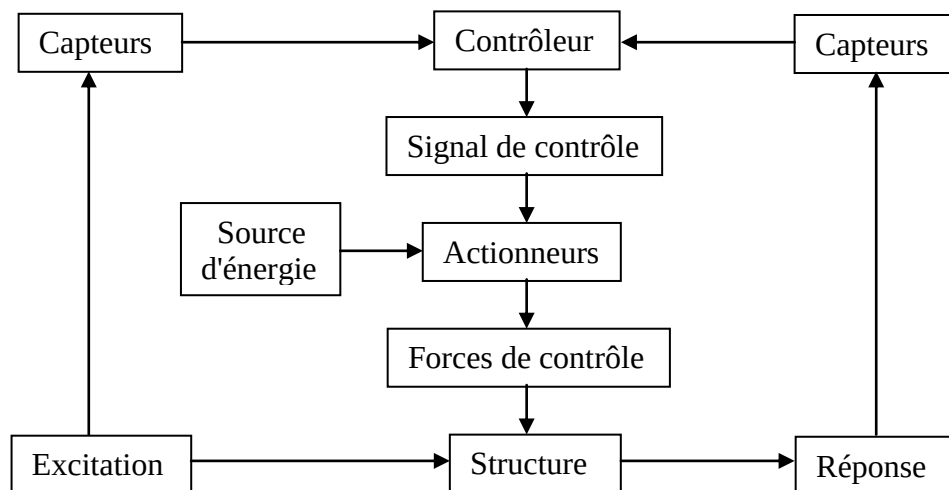


Figure 17 : Le diagramme de système de contrôle actif

Un système de contrôle actif consiste, premièrement, à placer les capteurs sur la structure pour identifier, à chaque instant, la réponse ou l'excitation. Seulement lorsque la réponse de la structure est mesurée, la configuration de contrôle est connue sous le nom de contrôle à boucle fermée : la réponse est mesurée à chaque instant et cette information est utilisée pour la correction de la force de contrôle appliquée instantanément. Mais, seulement

lorsque l'excitation est mesurée, le contrôle prend le nom de boucle ouverte. Par contre, si la réponse et l'excitation sont mesurées ensemble le terme utilisé dans la littérature est le contrôle à boucle fermée-ouverte. En deuxième étape, il consiste à choisir un système de contrôle convenable qui permet à l'actionneur, à chaque instant, de produire une force de contrôle, en apportant de l'énergie de l'extérieur. Le système de contrôle actif des réponses sismiques a suscité une attention considérable ces dernières années dû à ses avantages importants [02],[13].

Les chercheurs ont développé plusieurs dispositifs de contrôle actifs, tels que le Système d'amortisseur de masse actif AMD, le câble actif et le contreventement actif.

I-3-1- Système d'amortisseur de masse actif AMD

Un AMD s'appelle également un gestionnaire de masse actif. C'est un TMD évalué avec un mécanisme de contrôle actif. Les TMD sont seulement proposés pour le contrôle de la réponse structural quand le premier mode est dominant, comme le vent a induit la vibration structurale. Le développement des AMD se concentre sur le contrôle de la réponse sismique structurale avec une large bande de fréquence. Un modèle conceptuel d'une structure avec AMD est affiché sur la figure 18, avec une comparaison schématique entre l'AMD et le TMD. Un actionneur est installé entre le système primaire (la structure) et auxiliaire TMD. Le mouvement du système auxiliaire peut être contrôlé par l'actionneur pour augmenter l'efficacité de contrôle. Les AMD ont été proposés et étudiés analytiquement au début des années 80 [05],[26]. Suivant les indications du modèle conceptuel (figure 18), un actionneur est installé sur la structure AMD-contrôlée. Cet actionneur est mis entre les systèmes primaires (la structure) et les systèmes auxiliaires AMD. Le mouvement de ce dernier peut être contrôlé par l'actionneur pour augmenter l'efficacité du système de contrôle.

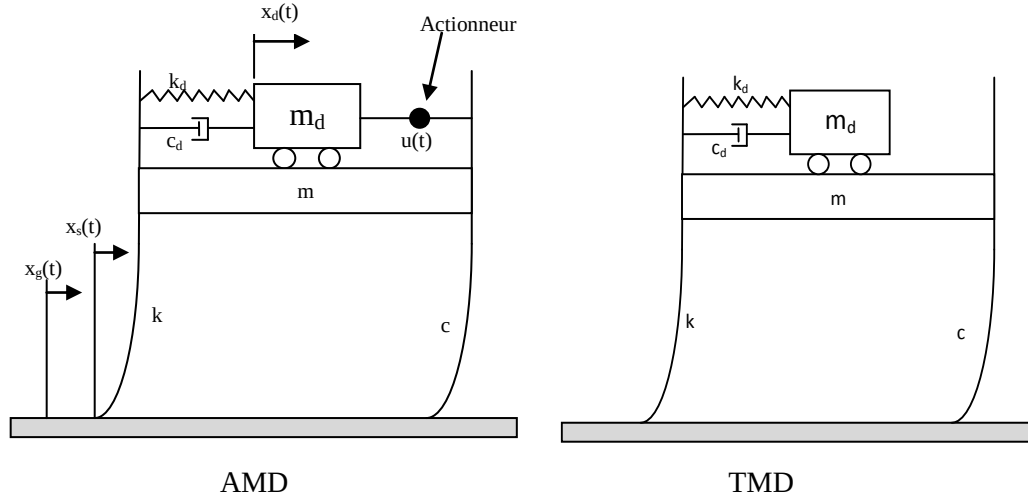


Figure 18 : Schéma de comparaison entre l'amortisseur de masse actif (AMD) et l'amortisseur de masse accordée (TMD)

I-3-2- Système de câble actif

Les systèmes de contrôle avec des câbles actifs se composent d'un ensemble de câbles précontraints dont la tension est contrôlée par les servomécanismes électro-hydrauliques [06],[10],[32].

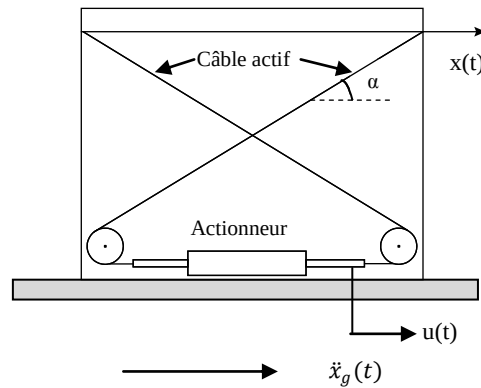


Figure 19 : le schéma de système de câble actif

La figure 19 affiche un type de configuration d'un système de contrôle actif qui utilise les câbles actifs. Des câbles actifs sont installés entre deux étages de la même structure. L'actionneur hydraulique est fixé au plancher ci-dessous. L'extrémité du câble est fixée au plancher supérieur et une autre à la tige de piston de l'actionneur. Sous l'excitation de tremblement de terre, la vibration structurelle induit le déplacement inter-étages qui transmet le mouvement relatif de la tige de piston vers l'actionneur hydraulique. Ce mouvement relatif change la tension des câbles précontraints, ce fait applique la force de contrôle dynamique à la structure pour réduire sa réponse sismique.

I-3-3- Système de contreventement actif

Un système de contreventement actif emploie les contreventements structuraux existants pour installer un dispositif de contrôle actif (actionneur). Trois types de système de contreventement actif, la diagonale de contreventement, les contreventements en K et en X peuvent être utilisés, les mêmes pour les amortisseurs passifs. Des actionneurs hydrauliques de contrôle servovalve capables de produire une force de contrôle importante sont montés sur le système de contreventement entre deux planchers adjacents.

La figure 20 affiche un système de contreventement actif avec un actionneur hydraulique monté sur un contreventement en K. Le cylindre d'actionneur est boulonné au plancher, et la tige de piston d'actionneur est fixée au contreventement. Ce système se compose d'une servovalve, un contrôleur de servovalve, un actionneur hydraulique, une force d'alimentation hydraulique, des capteurs, et un ordinateur de contrôle avec un algorithme de contrôle prédéterminé. Les capteurs mesurent le mouvement de la structure dû à l'excitation de tremblement de terre, l'ordinateur de contrôle emploie l'algorithme de contrôle pour traiter ces mesures pour produire le signal de contrôle, la servovalve utilise alors le signal de contrôle pour régler le sens et l'intensité de la force de contrôle par la différence de pression dans les deux chambres de l'actionneur. De ce fait la force de contrôle est produite pour réduire la réponse sismique de la structure.

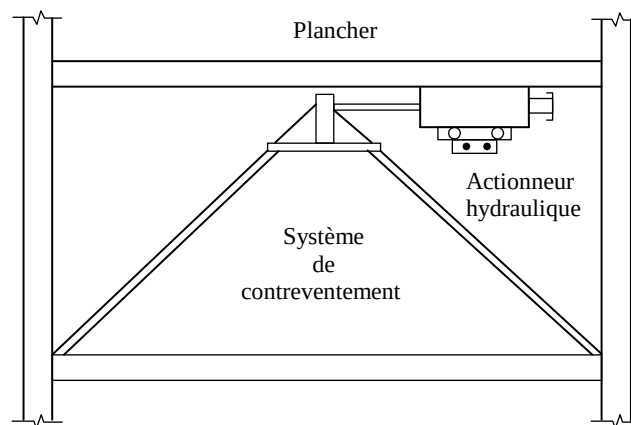


Figure 20 : Système de contreventement actif avec actionneur hydraulique

I-4- Système de contrôle semi actif

L'idée principale du système de contrôle semi-actif consiste à changer les caractéristiques des dispositifs passifs de dissipateurs d'énergie et systèmes inertiels couplés. Ce changement ne nécessite qu'une source minimale d'énergie.

L'action de contrôle pour une approche de système semi-actif se réalise à travers le réglage des paramètres mécaniques de dissipation qui réagit passivement avec le reste de la

structure. La modalité de réglage de ces paramètres est déterminée, selon la base d'un choix d'algorithme de contrôle, en fonction de l'excitation et/ou la réponse de la structure. Par conséquent, comme pour le contrôle actif, le système de contrôle semi-actif nécessite des capteurs, un ordinateur de contrôle ou système de contrôle et actionneurs. Mais l'énergie demandée de l'extérieur est minimale (une petite source d'énergie) par rapport à un système de contrôle actif, il sert seulement à modifier les caractéristiques mécaniques des dispositifs de contrôle, et peut fonctionner, par exemple, avec une simple batterie. C'est un grand avantage parce que la source d'énergie principale de la structure peut échouer pendant les événements sismiques, et l'actionneur n'a aucun potentiel nocif qui peut déstabiliser la structure. Bien que les amortisseurs semi actifs soient un peu plus complexes que les amortisseurs passifs, ils sont faciles à fabriquer, fiables à fonctionner, et avec un amortissement mieux.

Il existe différents types d'amortissement semi-actif proposés pour contrôler les structures en génie civil. Ci-dessous, nous présentons quelques exemples.

I-4-1- Amortisseurs semi actifs de masse accordée

En 1983, Hrovat et al [14] ont proposé un système semi actif avec TMD pour le contrôle des vibrations induites par le vent dans des structures élevées (figure 21). Ce système se compose d'un TMD et un actionneur installés sur la structure principale.

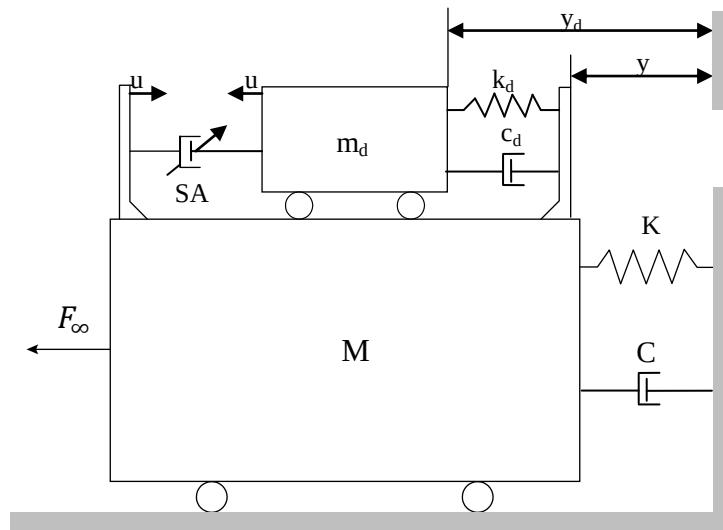


Figure21 : Le TMD Semi actif

Le système semi actif avec TMD a une masse m_d , un amortissement c_d , et de rigidité k_d , et la structure principale est représentée par la masse M , l'amortissement C , et la rigidité K . L'actionneur SA produit la force de contrôle u , cette force règle l'amortissement avec le

TMD pour rester toujours optimale à chaque changement d'excitation. Puisque la masse m_d de TMD est plus petite que la masse de la structure principale M , et la force de contrôle active employée pour changer la force d'amortissement du TMD est moins que la force d'inertie du TMD, un peu d'alimentation externe est exigé pour réaliser ce réglage. Les systèmes semi actifs avec TMD sont toujours dans l'étape de la recherche et de développement.

I-4-2- Amortisseurs semi actifs de liquide accordé

L'amortisseur semi actif avec TLD fait le réglage en accord avec le liquide en mouvement. Sur la base de deux types principaux de TLD, les chercheurs ont développé le système semi actif avec TLD trempé et TLD de colonne, le système semi actif avec TLD trempé se compose d'un ensemble de chicanes (des plaques métalliques avec des ouvertures) dans un récipient, un actionneur qui est utilisé pour régler l'orientation de ces chicanes sur la base d'un algorithme de contrôle prédéterminé. Puisque la fréquence naturelle de vibration de liquide change avec la longueur de récipient ou réservoir, l'accord du TLD peut être contrôlé par rotation des chicanes jusqu'à une position inclinée désirée. Avec ce mécanisme, on n'exige pas un actionneur puissant car les chicanes sont légères donc la performance de TLD peut être améliorée avec un petit coût supplémentaire. Le système semi actif avec TLD de colonne utilise un orifice variable pour mettre un amortissement optimal. Un actionneur électropneumatique est employé pour contrôler une valve sphérique et changer la section transversale de la colonne de TLD par un algorithme de contrôle prédéterminé, ce réglage des propriétés d'amortissement réalise une meilleure performance. Semblable au système de contrôle semi actif avec TMD [37], Le système de contrôle semi actif avec TLD est resté dans l'étape de la recherche et de développement.

I-4-3- Amortisseurs semi actifs à frottement

L'amortisseur semi actif à frottement utilise des actionneurs piézo-électriques (PE) qui sont une alternative aux systèmes magnétiques. Un cristal PE est un cristal dont la géométrie varie avec la tension électrique appliquée, comme le quartz par exemple. L'idée est de contrôler la déformation d'un actionneur grâce à un signal électrique. L'actionneur, sous l'action du champ électrique, va exercer une pression plus ou moins importante sur une surface de frottement. La valeur de la force de frottement est ainsi asservie au signal électrique [11].

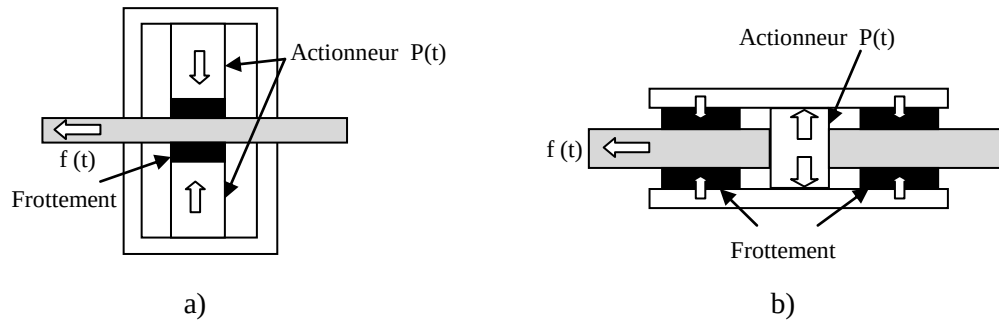


Figure 22 : Amortisseurs semi actifs à frottement avec actionneur piézoélectriques.

a) mode holding, c'est à dire que le frottement augmente avec la tension appliquée.

b) mode releasing pour lequel le frottement décroît avec la tension.

L'institut des sciences industrielles de l'université de Tokyo a effectué plusieurs tests afin d'évaluer l'efficacité de ce type de système pour le contrôle semi-actif. Le contrôle a été effectué sous trois modes : passif, c'est à dire sans contrôle électrique, semi-actif holding, c'est à dire avec un coefficient de frottement proportionnel au potentiel appliqué et semi-actif releasing, c'est-à-dire avec une force de frottement dont la valeur est inversement proportionnelle à la tension appliquée. Le mode releasing possède l'avantage de fournir une friction maximale lorsque le système électrique est détruit, un cas très probable en cas de séisme grave, ce qui laisse toujours un niveau de protection minimal à la structure quelle que soit la situation [11].

I-4-4- Amortisseurs semi actifs de vibration

Cette méthode utilise une valve avec un orifice variable pour régler l'écoulement dans un amortisseur hydraulique, ce concept a mené à l'apparition des amortisseurs semi actifs de vibration SAVD et également appelés des amortisseurs hydrauliques semi actifs SAHD.

Comme représenté sur la figure 23, un tel dispositif fournit le réglage de l'amortissement et de la rigidité. La capacité d'amortissement est produite par le fluide visqueux, et la rigidité est réglée par l'ouverture de la valve d'écoulement. Si la valve est fermée, le SAVD fonctionne comme un ressort de rigidité constante. Si la valve est ouverte, le fluide peut facilement traverser le tube et fournir un peu de rigidité à la structure [13],[29].

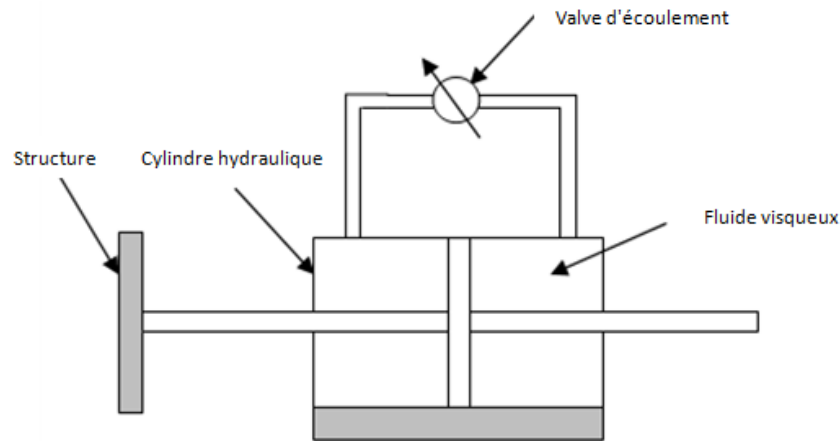


Figure 23: Amortisseurs semi actifs de vibration

I-4-5- Amortisseurs semi actifs à rigidité variable

Le système SAVS consiste en un ensemble de diagonales de contreventement en K dont les extrémités sont reliées aux bords de la structure pour atténuer les mouvements transversaux. La pointe est reliée à l'étage supérieur via un amortisseur (figure 24) [20]. Le signal de contrôle agit sur l'ouverture d'une valve qui en variant la pression de liquide, permet d'exercer une force sur le piston relié à l'étage supérieur. De cette façon, l'amortisseur agit selon la position de la valve et le système est capable de modifier sa réponse en fonction de la contrainte exercée. Les contreventements en K peuvent être installés en plusieurs configurations, à tous les étages ou uniquement à la base.

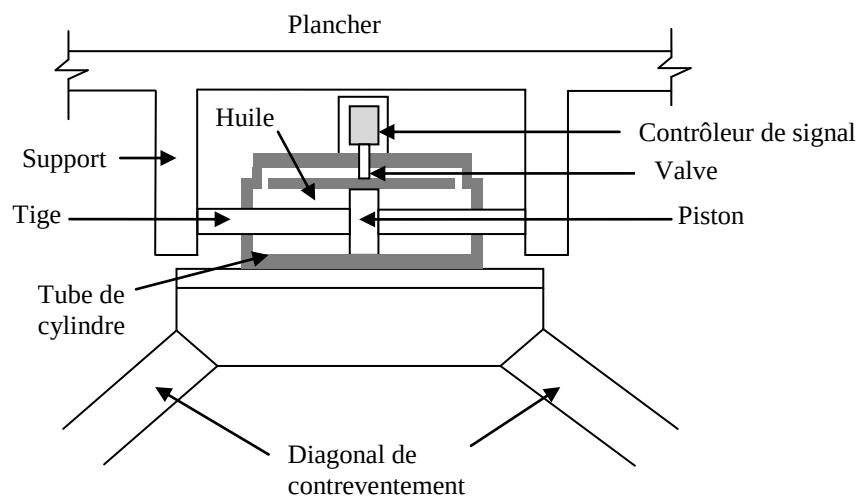


Figure 24 : Amortisseurs semi actifs à rigidité variable

I-4-6- Amortisseurs à fluide contrôlable

Les amortisseurs à fluide contrôlable possèdent des fluides dont les propriétés peuvent être influencées par la présence d'un champ magnétique ou électrique. Dans ces deux cas, les

amortisseurs sont appelés, respectivement, magnéto-rhéologique MR (figure 25-a) [21],[04] ou électro-rhéologique ER (figure 25-b)[39]. Le fluide rhéologique a été découvert pendant les années quarante. Le fluide change de comportement lorsqu'il est exposé à un champ magnétique ou électrique : il aura alors un comportement viscoplastique. Donc, l'application d'un tel fluide dans un amortisseur permet de contrôler sa viscosité à travers un champ électrique ou magnétique. Ces amortisseurs sont très fiables parce qu'ils n'ont pas des valves mécaniques à manipuler et ils peuvent être propulsés par de simples piles. Les applications de ce type d'amortisseur dans le domaine de structure sont nombreuses et encore un sujet de recherche.

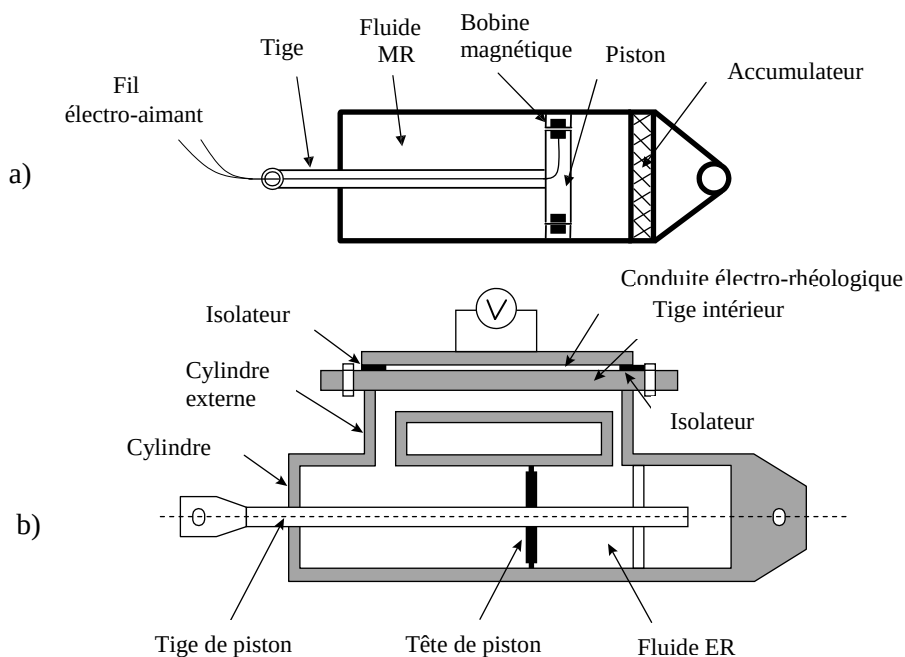


Figure 25 : Amortisseurs à fluide contrôlable :

a) Schéma d'amortisseurs magnéto- rhéologiques.

b) Schéma d'amortisseurs électro-rhéologiques.

I-4-7- Amortisseurs semi-actifs de fluide visqueux

Un amortisseur semi actif de fluide visqueux est illustré schématiquement sur la figure 26. Ce dispositif utilise pour le contrôle de la réponse sismique des structures une valve électromagnétique normalement fermée au début pour un amortissement passif. L'énergie est absorbée par le frottement entre l'écoulement du fluide visqueux, la boucle de déviation et l'orifice de la tête de piston (valve de relâchement). Quand l'ouverture de la valve est grande, le fluide visqueux peut facilement traverser la valve, et se développe une force d'amortissement moindre. Quand l'ouverture est petite, le fluide ne peut pas facilement

traverser la valve, et l'amortisseur fournit une plus grande force de contrôle. Le comportement d'amortissement est contrôlé par le réglage de l'ouverture de la valve selon un algorithme de contrôle avec une source minimale d'énergie externe [35], [17].

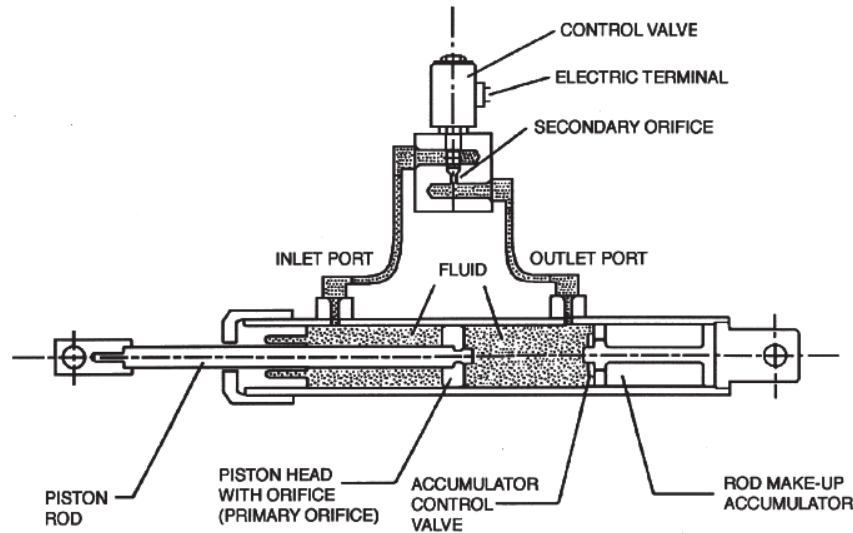


Figure 26 : Amortisseur semi-actif de fluide visqueux

I-5- Système de contrôle hybride

Il est remarquable que les systèmes de contrôle actifs sont introduits pour améliorer la capacité et l'intelligence limitées des amortisseurs passifs et semi actifs, mais le contrôle actif a toujours deux inconvénients. Le premier est son fonctionnement qui dépend d'une source d'énergie externe et il exige un système compliqué pour détecter les réponses et les excitations et pour le traitement de signal. Cette complexité limite son application et réduit la fiabilité de contrôle. Le deuxième, pour l'application de contrôle actif aux structures de génie civil, nécessite des grands équipements pour produire la force de contrôle, c-à-d, des grands actionneurs sont exigés. La technologie industrielle actuelle capable de fabriquer ces grands actionneurs mais son coût limite sévèrement son application. Les systèmes innovateurs de contrôle hybrides sont réalisés en combinant les techniques de contrôle passif et actif. Quand ces techniques fonctionnent ensemble, la fiabilité est assurée par le contrôle passif et la capacité est fournie par le contrôle actif, le système hybride rassemble les avantages des deux techniques dans une seule technique donc ce système est meilleur que les systèmes passifs, actifs et semi actifs. Trois types de système de contrôle hybride typique ont été développés : Amortisseurs de masse hybride HMD, système hybride avec isolateurs à la base, contrôle hybride avec amortisseur-actionneur de contreventement.

I-5-1- Amortisseurs de masse hybride HMD

Les amortisseurs de masse hybride combinent le contrôle passif de TMD avec un actionneur de contrôle actif, ou ils ajoutent un AMD au TMD suivant les indications de la figure 27.

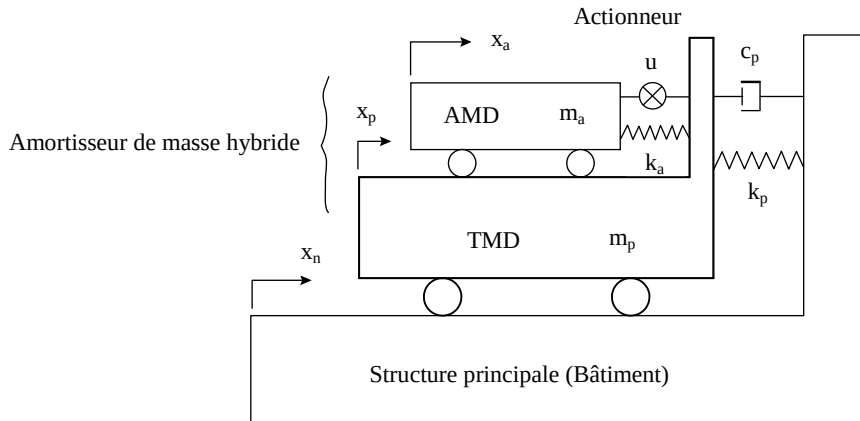


Figure 27 : Amortisseur de masse hybride

Un AMD est fixé au TMD au lieu de la structure principale et l'AMD doit être petit (la masse d'AMD est de 10 à 15% de la masse de TMD). La capacité d'amortissement de HMD est liée principalement sur le mouvement de TMD. L'actionneur produit une force de contrôle, qui règle le TMD et l'augmente ainsi l'efficacité et la solidité du dispositif pour changer les caractéristiques dynamiques de la structure. En d'autres termes, le TMD est accordé au mode fondamental de la structure, et l'AMD est conçu pour améliorer l'efficacité de contrôle pour les modes supérieurs de la structure. Ainsi, l'énergie et les forces exigées pour actionner un HMD sont plus moins que ceux liées à un système d'AMD avec la performance comparable. Cette caractéristique rend les HMD relativement pas chers pour améliorer l'efficacité de contrôle [30], [34], [38].

I-5-2- Système hybride avec isolateurs à la base

Le système hybride avec isolateurs à la base combine un système passif avec isolateurs à la base et un système de contrôle actif, ce système consiste d'un système de câble actif sur la superstructure et d'un système avec isolateurs à la base entre les fondations et la superstructure (figure 28) [40]. Les études théoriques ont été menées pour le système avec isolateurs à la base/actionneur, y compris le non linéarité du système, la réponse rétroaction (output feedback) directe, le contrôle technique de mode glissant, et la conception de la surface de glissement.

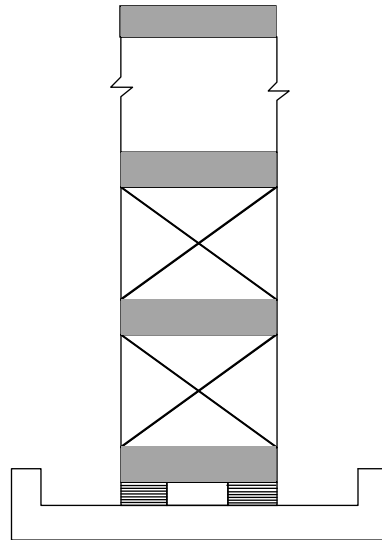


Figure 28 : Système hybride avec isolateurs à la base

I-5-3- Contrôle hybride amortisseur-actionneur de contreventement

Au début des années 90, Cheng et ses associés ont commencé à développer un Contrôle hybride amortisseur-actionneur de contreventement (également appelé un système hybride de contreventement) monté sur un contreventement en K suivant les indications de la figure (29a).

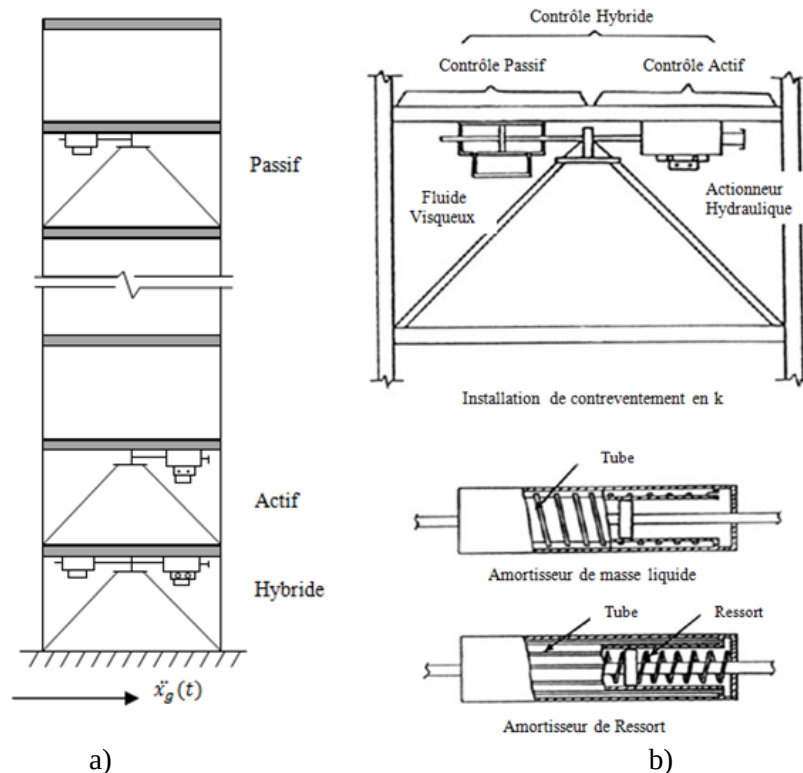


Figure 29 : Contrôle hybride amortisseur-actionneur de contreventement :

a) configuration du système dans la structure.

b) installation du système.

Des amortisseurs de masse liquides, amortisseurs de ressort et amortisseurs fluides visqueux sont suggérés en tant que dispositifs passifs pour le système. On propose des actionneurs hydrauliques comme dispositif actif pour le système dû à leur capacité de produire des forces puissantes (29b).

Un système de contreventement hybride est plus attrayant que d'autres systèmes de contrôle hybride dû aux avantages supplémentaires. Dans ce système, un amortisseur et un actionneur peuvent être combinés ou séparés. L'installation des dispositifs de contrôle sur une structure peut employer les contreventements structuraux existants, et la force de contrôle actif est appliquée directement à la structure. Ainsi un système de contreventement hybride a des coûts moins qu'un système hybride avec isolateur à la base et plus de capacité de contrôle qu'un HMD [13],[08],[07].

I-6- Méthodes de calcul des structures isolées

Le règlement parasismique Algérien RPA ne contient pas de recommandations relatives aux calculs des structures isolées. Pour cela, on a adopté les recommandations du code international (International Building Code) IBC-2000, les structures isolées à la base peuvent être analysées suivant les trois méthodes suivantes [23], [16] :

- La méthode statique équivalente ou la méthode de la force latérale équivalente.
- La méthode d'analyse modale spectrale.
- La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes.

I-6-1- Méthode statique :

Cette méthode est applicable pour les structures satisfaisant aux conditions suivantes selon l'IBC-2000 :

1. La structure est située sur un site avec $S_1 \leq 0.6g$ (S_1 déterminé par la carte de l'accélération spectrale associée à l'IBC-2000).
2. La structure est située sur un site de classe A (roche dure), B (roche), C (Sol très dense et roche meuble) ou D (sol ferme).
3. La hauteur de la structure isolée ne doit pas dépasser 4 niveaux (65 feet ou 20 m).
4. La période effective correspondant au déplacement maximum T_M du système d'isolation est inférieure ou égale à 3.0 seconde.
5. La période effective correspondant au déplacement de conception T_D est trois fois plus grande que la période de la structure à base fixe.
6. La structure au dessus du système d'isolation est de forme régulière.

7. La rigidité effective du système d'isolation au déplacement de conception est supérieure au tiers de la rigidité effective à 20% de déplacement de conception.
8. Le système d'isolation est capable de produire une force de rappel selon (IBC-2000 Sec. 1623.5.1.4).
9. Les caractéristiques force et déplacement du système d'isolation sont indépendantes du taux de chargement, de la charge verticale et de la charge bilatérale.
10. Le système d'isolation ne limite pas les déplacements MCE au dessous de S_{M1}/S_{D1} fois les déplacements de conception total.

I-6-1-1- Calcul des déplacements :

Les deux déplacements de conception minimal et maximal D_D et D_M sont définis comme suit :

Le déplacement minimal de conception D_D correspondant au niveau DBE (Design Basis Earthquake) ce niveau du mouvement de tremblement de terre a une probabilité de 10% pour être excédé en 50 ans (la période de retour du tremblement de terre est de 475années).

Le déplacement maximal D_M correspondant au niveau MCE (Maximum Capable Earthquake) est le niveau maximum de secousse sismique qui pourrait toucher le site où se trouve la structure. Le MCE est pris en tant que probabilité de 2% pour être dépassé en 50 ans (la période de retour du tremblement de terre est de 2500 années).

Ces déplacements sont calculés au centre de rigidité du système d'isolation par les formules suivantes :

$$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{D1} T_D}{B_D} \quad (01)$$

$$D_M = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{M1} T_M}{B_M} \quad (02)$$

Avec :

S_{D1} et S_{M1} sont correspondant avec les deux paramètres suivants :

S_{D1} : L'accélération spectrale correspondant à 5% d'amortissement du niveau MCE.

F_v : Le coefficient de site. Avec : $S_{M1} = F_v S_1$ et $S_{D1} = 2/3 S_{M1}$.

T_D , T_M : sont les périodes effectives de la structure isolée aux niveaux DBE et MCE respectivement, elles sont déterminées comme suit :

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D,min} g}} \quad (03)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M,\min} g}} \quad (04)$$

W : Poids de la structure.

g : Accélération de la pesanteur.

B_D, B_M : Coefficients liés aux amortissements effectifs β_D et β_M du système d'isolation (Facteurs d'amortissement réduit) correspondant respectivement aux niveaux de réponse DBE et MCE.

Avec :

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\text{la surface totale de la boucle hystérisis}}{K_{D,\max} D_D^2} \right) \quad (05)$$

$$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\text{la surface totale de la boucle hystérisis}}{K_{M,\max} D_M^2} \right) \quad (06)$$

$K_{D,\min}$: la valeur minimale de la rigidité effective $K_{D,\text{eff}}$ correspondant au déplacement de conception D_D .

$K_{D,\max}$: la valeur maximale de la rigidité effective $K_{D,\text{eff}}$ correspondant au déplacement de conception D_D .

$K_{M,\min}$: la valeur minimale de la rigidité effective $K_{M,\text{eff}}$ correspondant au déplacement de conception D_M .

$K_{M,\max}$: la valeur maximale de la rigidité effective $K_{M,\text{eff}}$ correspondant au déplacement de conception D_M .

Les valeurs maximales de la rigidité effectives $K_{D,\max}$ et $K_{M,\max}$ sont déterminées, le facteur d'amortissement réduit B (B_D et B_M correspondant aux DBE et MCE respectivement) est donné en terme d'amortissement effectif β dans le tableau 01 selon l'IBC-2000.

Amortissement effectif β (%)	Facteur B_D ou B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
>50	2.0

Tableau 01: Les facteurs d'amortissements B_D et B_M

De même, une fonction d'approximation des valeurs du tableau est donnée par :

$$\frac{1}{\beta} = 0.25(1 - \ln \beta) \quad (07)$$

I-6-1-2- Calcul du déplacement total :

Les déplacements totaux sont le déplacement total minimal D_{TD} et le déplacement total maximal D_{TM} qui incluent la torsion. De même, le déplacement total est le déplacement d'un appui placé sous un poteau d'angle.

D_{TD} et D_{TM} ne doivent pas être pris inférieurs aux déplacements données par les formules suivantes :

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \left(\frac{12 e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (08)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \left(\frac{12 e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (09)$$

Avec :

e : est l'excentricité réelle entre le centre de la masse de la structure au-dessus du système d'isolation et le centre de la rigidité de ce dernier, plus 5 % d'excentricité accidentelle.

y : est la distance perpendiculaire entre l'élément d'appui d'angle considéré et le centre de la rigidité du système d'isolation selon la direction de calcul considérée.

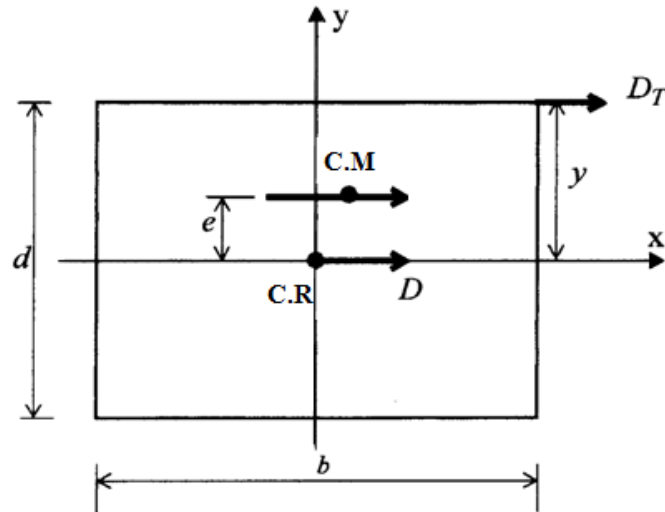


Figure 30 : Dimensions en plan pour la détermination du déplacement total

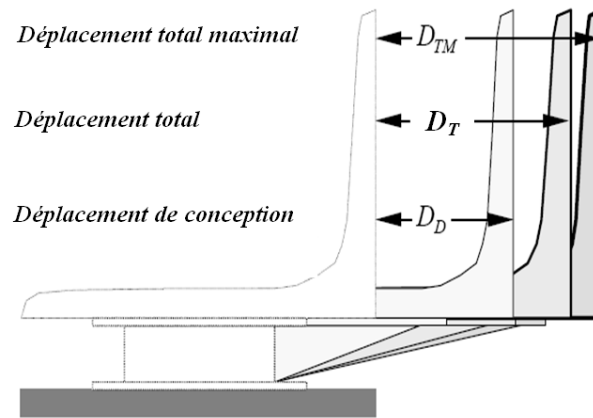


Figure 31 : Déplacement du système d'isolation

I-6-1-3- Calcul des forces sismiques :

Le système d'isolation et les éléments structuraux au-dessous de l'interface d'isolation sont conçus pour résister à la force sismique minimale donnée par la formule suivante:

$$V_b = K_{Dmax} D_D \quad (10)$$

La force sismique minimale pour les éléments au-dessus de l'interface d'isolation est donnée comme suit :

$$V_s = \frac{V_b}{R_I} = \frac{K_{Dmax} D_D}{R_I} \quad (11)$$

R_I : Facteur de réduction de la force de conception relié au type du système de contreventement des structures, selon l'IBC-2000.

$$1.0 \leq R_I = 3R/8 \leq 2.0$$

La force sismique V_S ne devrait pas être prise inférieure à :

- La force de cisaillement requise pour la conception d'une structure à base fixe avec la période de la structure isolée T_D .
- La force de cisaillement correspondant à la charge de conception du vent.
- 3/2 fois la force latérale exigée pour activer entièrement le système d'isolation.

I-6-1-4- Distribution verticale de la force sismique :

La force sismique latérale totale V_S doit être distribuée sur la hauteur de la superstructure selon la formule suivante :

$$F_x = V_S \frac{w_x h_x}{\sum_{i=1}^N w_i h_i} \quad (12)$$

Avec :

h_x : niveau de plancher où s'exerce la force F_x au dessus du niveau de l'interface d'isolation.

h_i : niveau de plancher quelconque i au dessus du niveau de l'interface d'isolation.

w_x, w_i : poids revenant aux planchers x et i .

I-6-1-5- Déplacements inter étages :

Les déplacements entre étages ne doivent pas dépasser $0.015h_x$ selon l'IBC-2000.

I-6-2- Méthodes dynamiques :

L'analyse dynamique peut être utilisée dans tous les cas, et en particulier, dans le cas où la méthode statique n'est pas permise. Cette analyse peut être effectuée sous forme d'une analyse modale spectrale ou d'une analyse de réponses temporelles (analyse par accélérogrammes).

I-6-2-1- Calcul des déplacements :

Selon l'IBC-2000 le déplacement total de conception D_{TD} et le déplacement maximum total D_{TM} pour le système d'isolation peuvent être réduits par la méthode dynamique de pas moins de 90% et 80% respectivement de celui donné par la formule statique.

Les déplacements D_{TD} et D_{TM} sont calculés en multipliant les déplacements D_D et D_M par un multiplicateur, et l'IBC-2000 autorise une autre réduction en remplaçant les déplacements D_D et D_M des formules statiques par D'_D et D'_M comme suit :

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T/T_D)^2}} \quad (13)$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}} \quad (14)$$

T étant la période de la structure à base fixe calculée par la formule empirique du code.

I-6-2-2- Calcul des forces sismiques :

Pour le système d'isolation la force sismique ne doit pas être prise inférieure à 90% de V_b .

Pour une forme régulière de la superstructure en plan et en élévation, la force sismique ne doit pas être prise inférieure à 80% de V_s et pas inférieure à 60% de V_s dans le cas d'une analyse par accélérogrammes.

Pour une forme irrégulière, la force sismique ne doit pas être prise inférieure à V_s et pas inférieure à 80% de dans le cas d'une analyse par accélérogrammes.

I-6-2-3- Déplacements inter étages :

Les déplacements inter étages correspondants à la force latérale, en tenant compte du déplacement dû à la déformation verticale du système d'isolation, sont donnés comme suit :

Les déplacements inter étages d'une structure isolée calculés par la méthode spectrale ne doivent pas dépasser $0.015 h_x$ selon l'IBC-2000.

Les déplacements inter étages d'une structure isolée calculés par accélérogramme ne doivent pas dépasser $0.020 h_x$ selon l'IBC-2000.

Paramètres de conception	Méthode statique	Méthodes dynamiques	
		Modale spectrale	Réponses temporelles
Déplacement minimal de conception	$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{D1} T_D}{B_D}$	/	/
Déplacement minimal total de conception	$D_{TD} = D_D \left[1 + y \left(\frac{12 e}{b^2 + d^2} \right) \right] \geq 1.1 D_D$	$\geq 0.9 D_{TD}$	$\geq 0.9 D_{TD}$
Déplacement maximal	$D_M = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{M1} T_M}{B_M}$	/	/
Déplacement maximal total	$D_{TM} = D_M \left[1 + y \left(\frac{12 e}{b^2 + d^2} \right) \right] \geq 1.1 D_M$	$\geq 0.8 D_{TM}$	$\geq 0.80 D_{TM}$
Force sismique au dessous du système d'isolation	$V_b = K_{D,max} D_D$	$\geq 0.90 V_b$	$\geq 0.90 V_b$
Force sismique pour une structure régulière	$V_s = \frac{K_{D,max} D_D}{R_I}$	$\geq 0.80 V_s$	$\geq 0.60 V_s$
Force sismique pour une structure irrégulière	$V_s = \frac{K_{D,max} D_D}{R_I}$	$\geq 1.0 V_s$	$\geq 0.8 V_s$
Déplacement inter étages	$\leq 0.015 h_x$	$\leq 0.015 h_x$	$\leq 0.020 h_x$

Tableau 02 : Valeurs minimales de l'analyse dynamique données en fonction des valeurs de l'analyse statique

I-7- Conclusion

Au cours des 20 dernières années, des technologies innovatrices comme les dispositifs de dissipation d'énergie et d'isolation à la base ont été développées, et elles ont servi à améliorer la performance sismique des bâtiments. Les dispositifs de dissipation d'énergie comme les amortisseurs peuvent diminuer les dommages potentiels aux bâtiments en absorbant une quantité significative de l'énergie produite dans un bâtiment lors d'une secousse sismique et les isolateurs de la base jouent le rôle de couche flexible entre la fondation et le bâtiment; par conséquent, les mouvements du sol ont une incidence faible ou nulle sur la structure du bâtiment. L'isolation de la base est une solution technique qui peut atténuer les accélérations importantes du sol et les mouvements entre les étages.