

Structures intelligentes

Abdellatif MEGNOUNIF

Contrôle Dynamique et Structures intelligentes



1. Introduction

Croissance
démographique

Augmentation de
constructions (nbr et
complexité)

Clients exigeants

Etc...

*Risques importants (surtout le
risque sismique)*

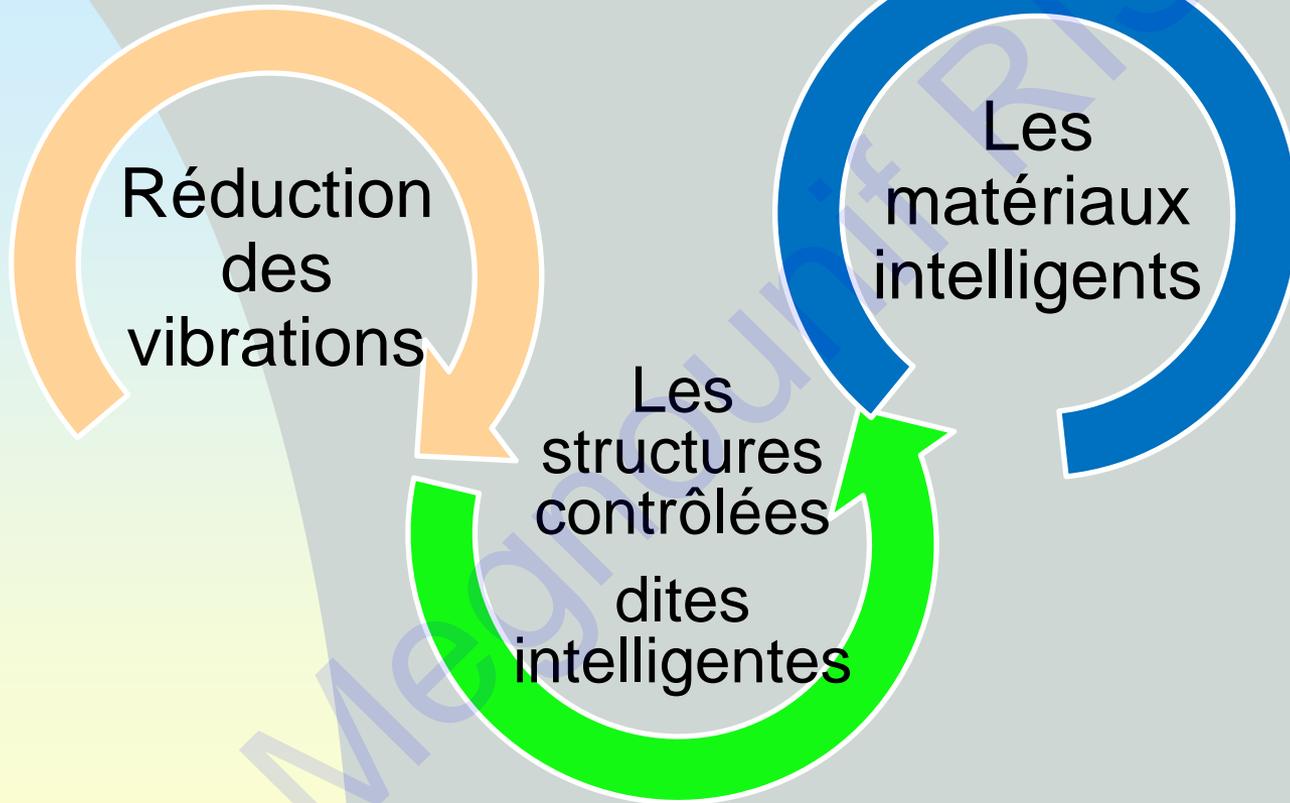
Nécessite plus de résistance

*Mais la réponse est toujours
limitée*

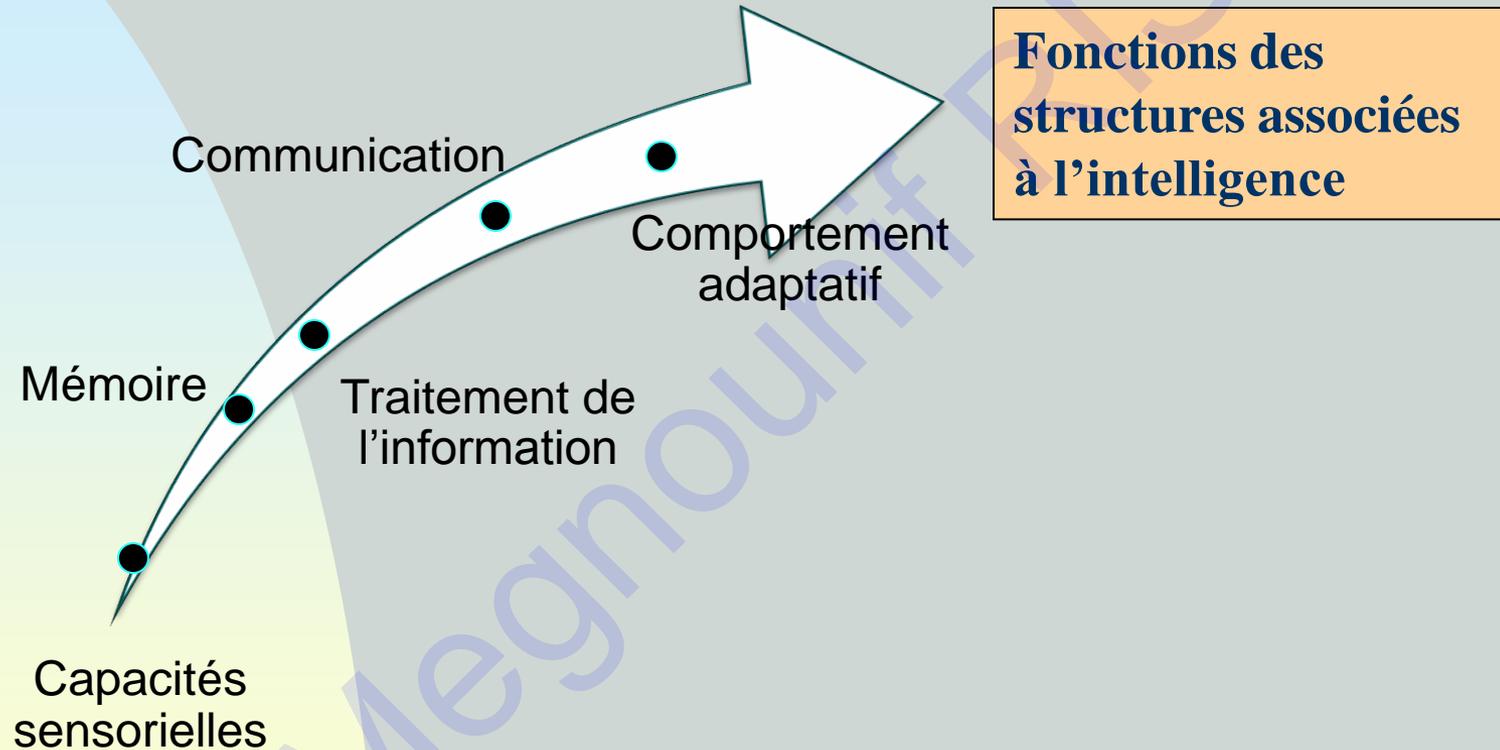
« As long as the precise characteristics of earthquake ground motion vis-à-vis a building cannot be predicted, seismic response must be controlled on the receiving end, the building structure »

Kobori and Minai

Solutions

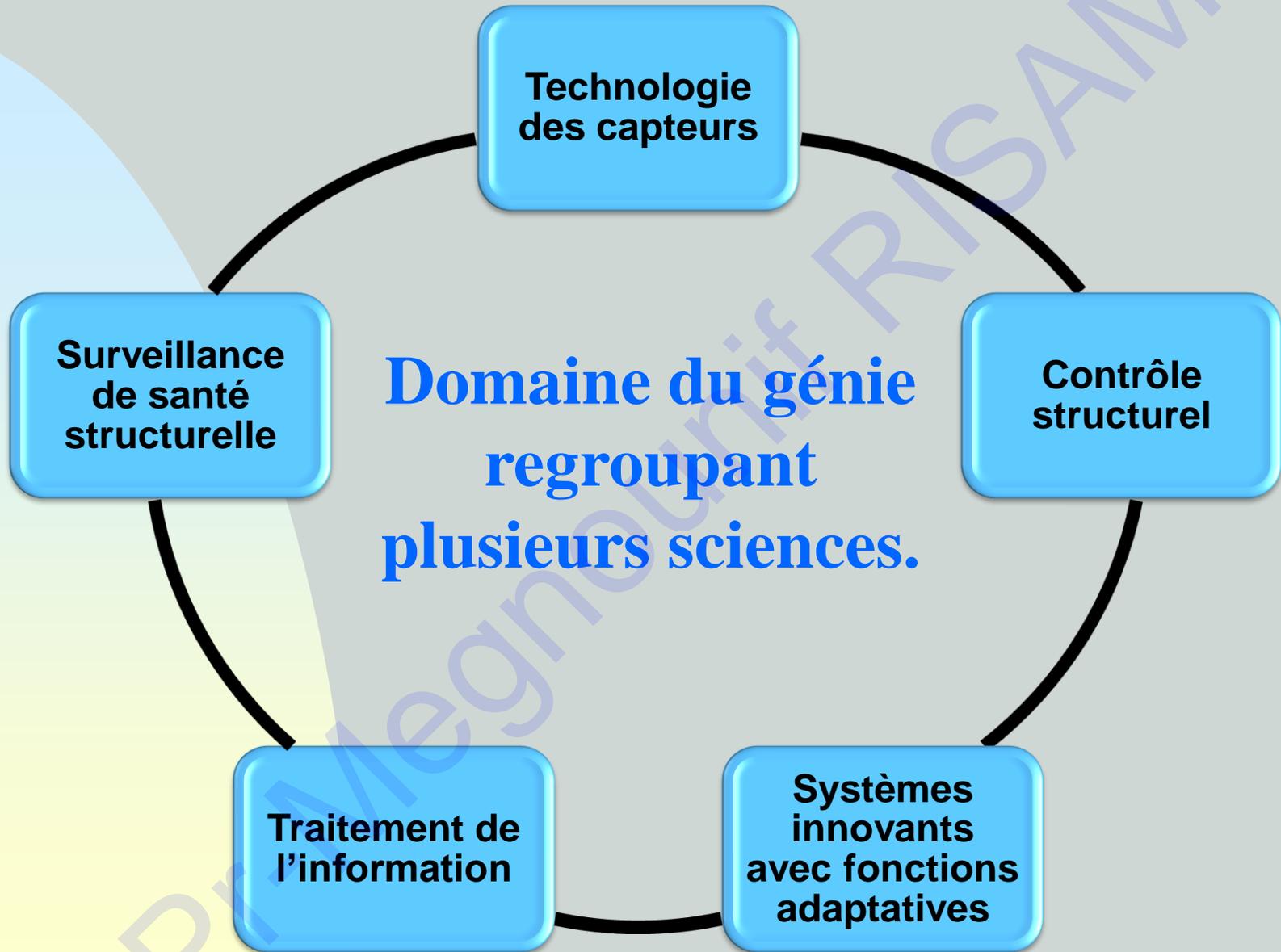


2. Définition: structure intelligente (smart structure)



L'intelligence peut être définie comme la capacité à apprendre ou à comprendre ou à faire face à des nouvelles situations.

2. Définition: structure intelligente (smart structure)



Technologie des systèmes intelligents

Système **innovant** qui est plus efficace dans la **protection** des structures.

Il a pour but d'**absorber** l'énergie dommageable et de **neutraliser** la force (vent, séisme, ...etc.) néfaste sur la structure, et cela manifeste par la **réduction** de la réponse structurelle et les dommages éventuels.

«les systèmes intelligents sont issus d'un domaine de recherche qui envisageait des dispositifs et des matériaux qui pourraient imiter le système musculaire et le système nerveux humains ». Pr GEORGES AKHRAS



Systemes intelligents

```
graph TD; A((Systemes intelligents)) --> B[Matériaux intelligents]; A --> C[Structures intelligentes]; B --> D["1. Alliage à mémoire de forme (AMF)  
2. Fibres optiques  
3. Piézoélectrique  
4. Magnétostrictif  
5. Fluides Electrostrictif  
6. ..."]; C --> E["Incorporer des dispositifs de contrôle (actionneurs, capteurs et réseaux de traitement) dans la structure pour diminuer les réponses"];
```

Matériaux intelligents

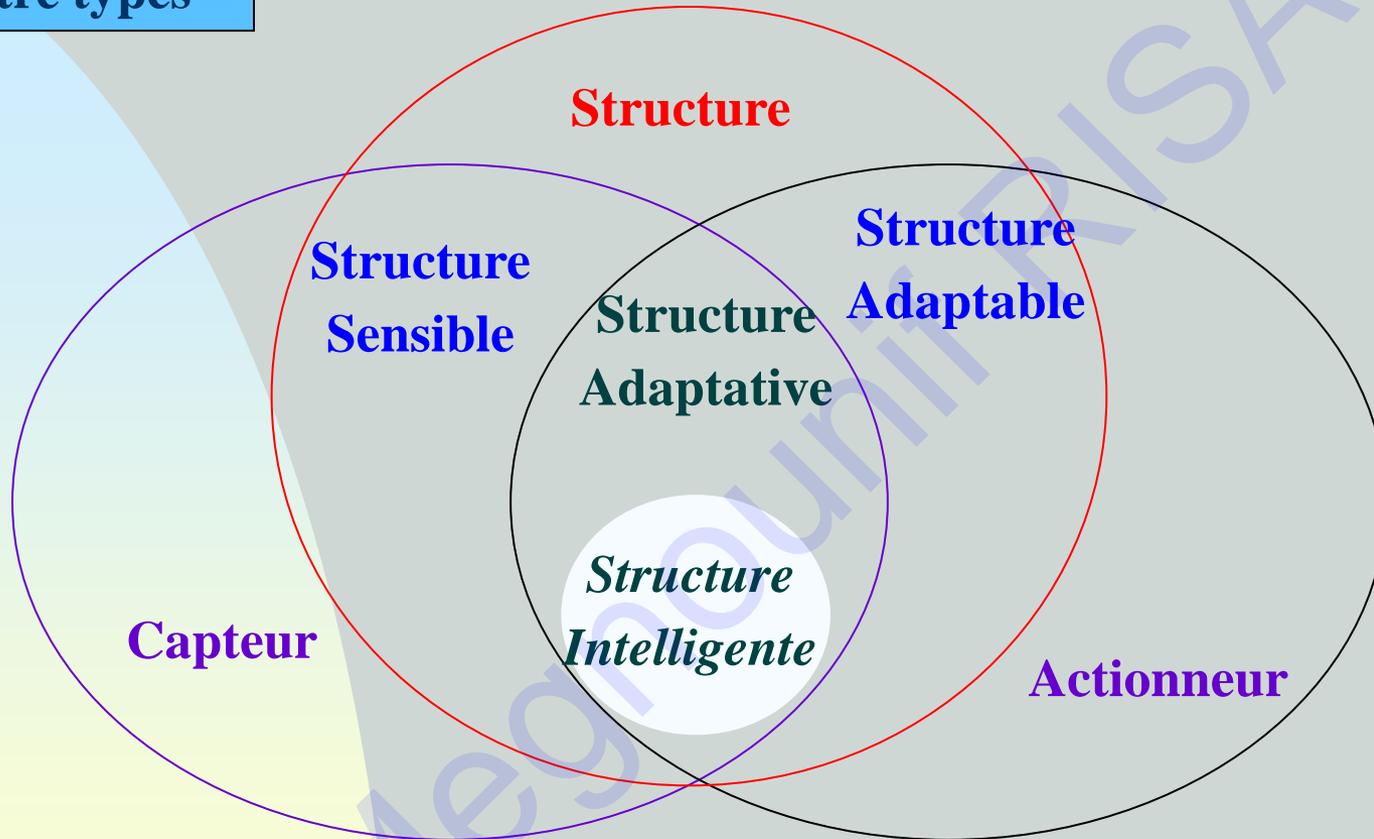
1. Alliage à mémoire de forme (AMF)
2. Fibres optiques
3. Piézoélectrique
4. Magnétostrictif
5. Fluides Electrostrictif
6. ...

Structures intelligentes

Incorporer des dispositifs de contrôle (actionneurs, capteurs et réseaux de traitement) dans la structure pour diminuer les réponses

Type de structure intelligentes

Quatre types



Types

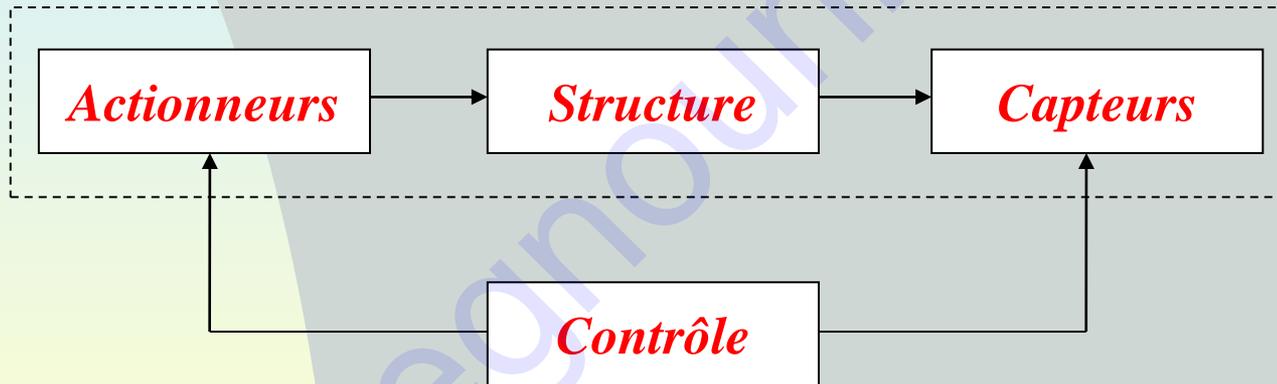
- ❑ la structure **sensible** : comprend des capteurs ou senseurs susceptibles d'apporter au système des informations sur l'environnement ou elle-même et de les transmettre à son utilisateur,
- ❑ la structure **adaptable** : comprend des actionneurs pouvant modifier leurs caractéristiques. Ainsi, la structure s'adaptera à l'environnement.
- ❑ Le but recherché est de combiner les deux afin d'augmenter les caractéristiques de la nouvelle structure.
- ❑ la structure **adaptative** : le matériau est à la fois sensible et adaptable. Il réagit à un seul type de sollicitation suivant une loi de comportement bien définie. Ce type de réaction nécessite la présence d'un processeur assurant un lien entre la fonction capteur et la fonction actionneur,
- ❑ la structure **intelligente** qui réagit à un ensemble de sollicitations en fonction de sensibilités qui lui seront proposés.



Structure intelligente

Une structure contenant des actionneurs et capteurs collés ou intégrés et couplés par un système de contrôle (Figure) est dite intelligente ou adaptative.

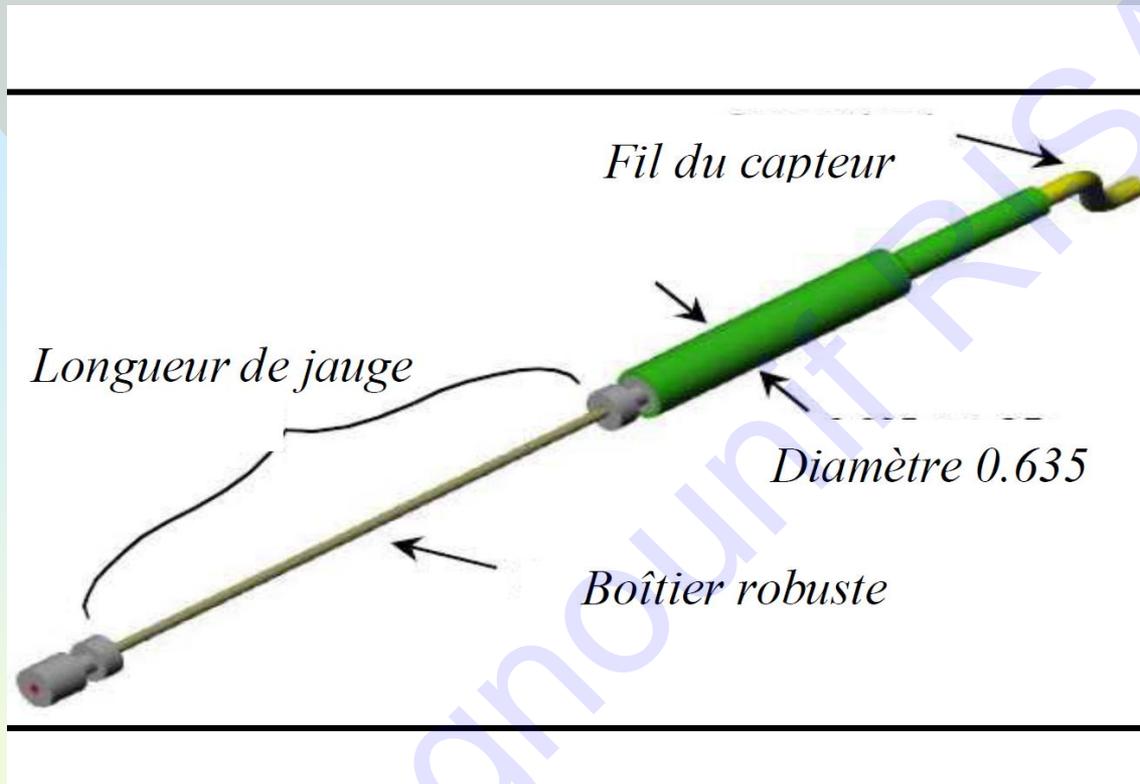
Les mesures fournies par le capteur sont traitées par un système de contrôle approprié, qui envoie ensuite à l'actionneur un signal capable de modifier le comportement de la structure, l'adaptant à un comportement requis.



Les Actionneurs et Capteurs sont très intégrés dans la structure par collage de surface ou enrobage sans provoquer des changements significatifs dans la rigidité de masse ou structurelle du système



Capteurs



Transformer la grandeur à mesurer en information interprétable.

Sortie en forme des signaux de tension qui sont envoyés au contrôleur pour le traitement

Unité de commande de contrôle

C'est le cerveau de la structure intelligente

Elle contrôle un groupe d'instruments intégrés en gérant les capteurs et les actionneurs à fibre optique ou en surveillant les dispositifs opérationnels et les dispositifs de contrôle.

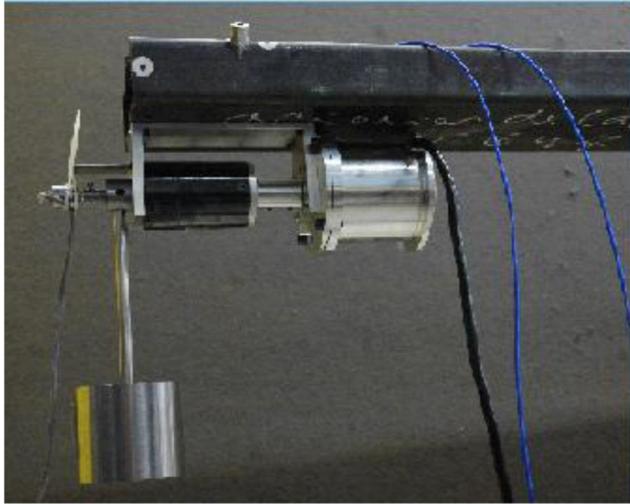
Remplit deux fonctions élémentaires distinctes :

La fonction de traitement : l'unité reçoit l'information, l'analyse, la trie, l'arrange et la classe; ensuite, elle la stocke et/ou la traite en fonction de la nature, de la fréquence, de la qualité et de l'origine des données. (Utilisation d'algorithmes spéciaux de reconnaissance des formes).

La fonction d'analyse : l'unité examine minutieusement les données brutes d'une manière intelligente. À partir de l'analyse décrite précédemment, l'unité exploite les résultats pour évaluer l'état de la structure. Cette analyse consiste à trouver et à identifier des variables, des caractéristiques ou des items précis par rapport aux seuils fixés à l'avance ou à des codes, des règles, des normes ou des règlements particuliers. l'unité envoie les mesures à prendre aux dispositifs de contrôle de l'action, qui réagissent en conséquence.



Actionneurs



Un actionneur est l'organe de la partie opérative qui, recevant un ordre de la partie commande via un éventuel pré-actionneur, **convertit l'énergie** qui lui est fournie en un **travail utile à l'exécution de tâches** d'un système automatisé. En d'autres termes, un actionneur est l'organe fournissant la force nécessaire à l'exécution d'un travail ordonné par une unité de commande distante



3. Contrôle des structures

La technologie des structures intelligentes

Contrôle de santé des structures

- Mesurer les réponses structurelles,
- Identifier et localiser l'apparition des dommages structurels
- Réparer ces points faibles

(Structural Health Monitoring)

Contrôle structurel

- Défini comme un système mécanique installé dans une structure pour réduire les vibrations structurelles.

(Surtout en parasismique)

Quatre types de systèmes de contrôle

Contrôle passif
1970

Contrôle actif
1970-1990

Contrôle semi-actif
1990-2000

Contrôle hybride
2000-....

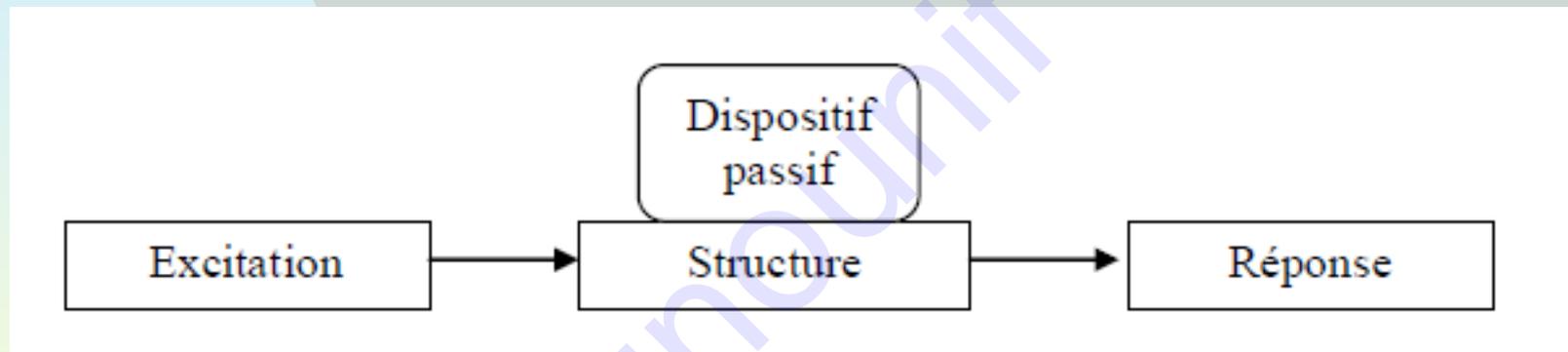
Les systèmes passifs peu coûteux à entretenir et ne nécessitent aucune puissance pour être efficace, mais ces systèmes ne peuvent pas être modifiés une fois installé.

Les systèmes actifs s'appuient sur des algorithmes complexes aux vibrations de combat, mais ces systèmes nécessitent une immense source d'alimentation externe.

Les systèmes hybrides et les systèmes semi-actifs combinent les systèmes passifs et actifs pour maximiser l'effet d'amortissement, mais ils sont plus chers et sont encore l'objet de recherches.

Contrôle passif

Les techniques passives d'amortissement des vibrations structurales utilisent l'intégration ou l'ajout de matériaux ou systèmes, possédant des propriétés amortissantes, couplés à la structure de telle façon que les vibrations de la structure sont amorties passivement, c'est-à-dire, sans aucune intervention extérieure supplémentaire



Le contrôle passif de la réponse d'une structure consiste à changer la période de sa réponse par oscillation, le plus souvent en l'allongeant considérablement ainsi que ses capacités d'amortissements

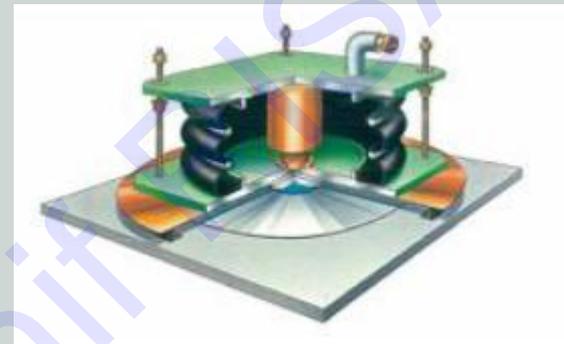
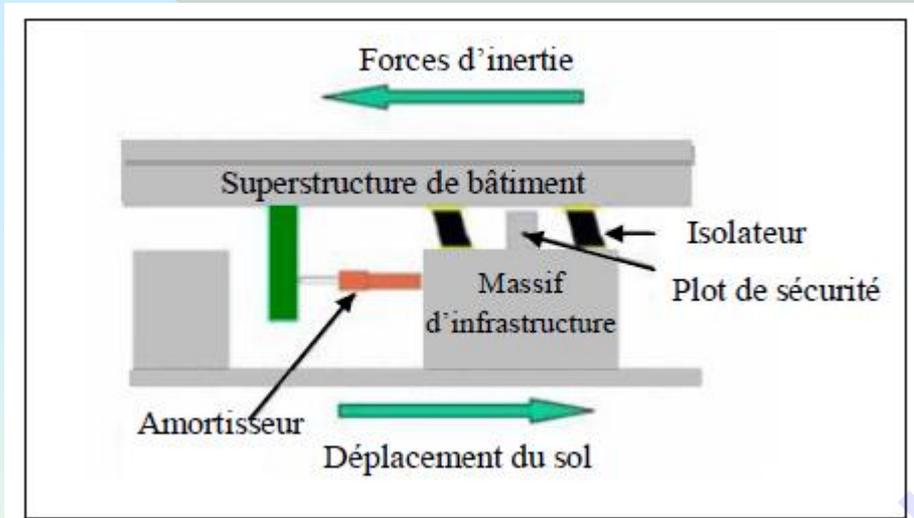
Concept qui remonte au début du 20^{ème} siècle.



Isolation à la base par des pièces de bois en Lahijan, Iran

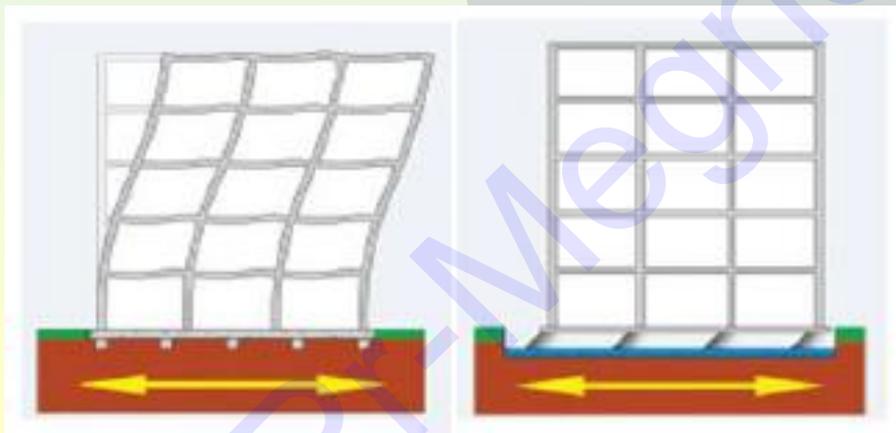
Qlqs Systèmes passifs

Systèmes d'isolation passifs



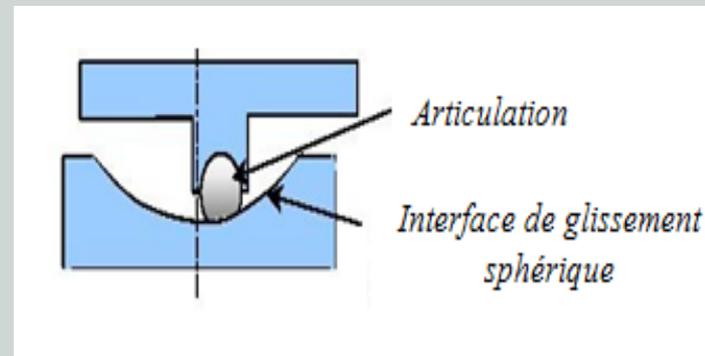
Type d'isolateur

Isolation sismique



Sans

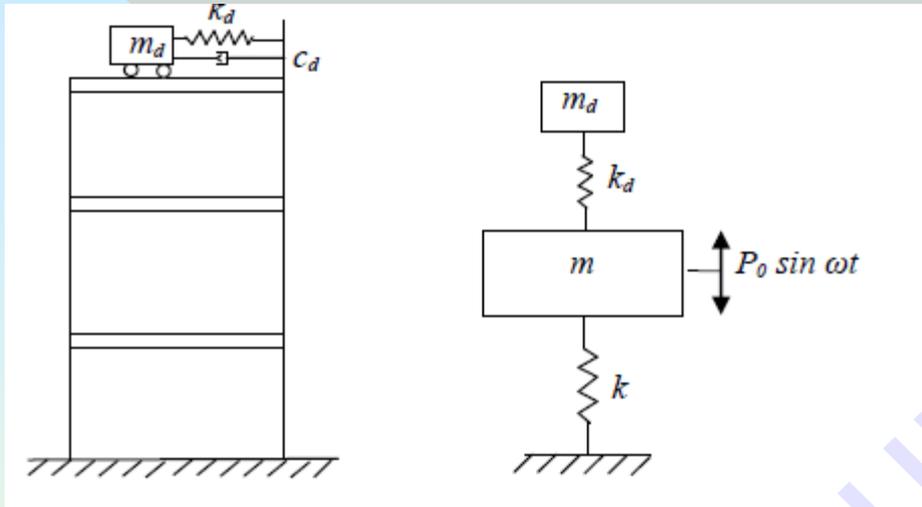
Avec



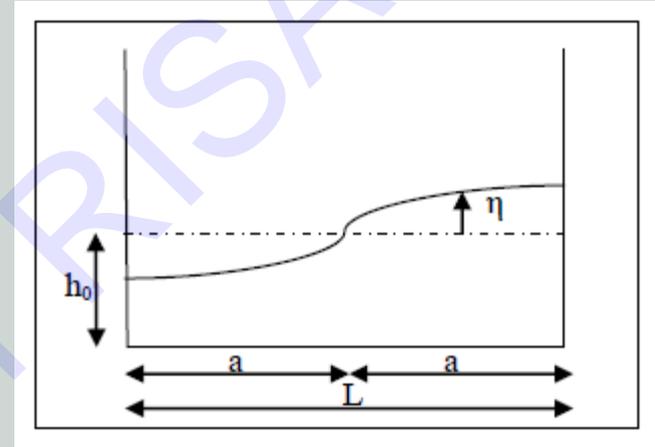
Isolateur à base de glissement
Pendule à friction

Qlqs Systèmes passifs

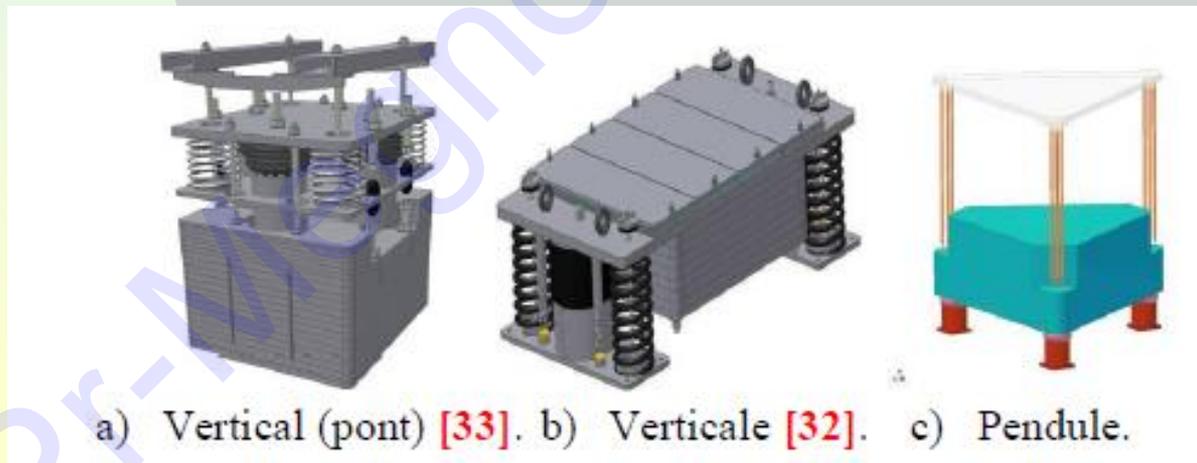
Systèmes d'absorption d'énergie passifs



TMD



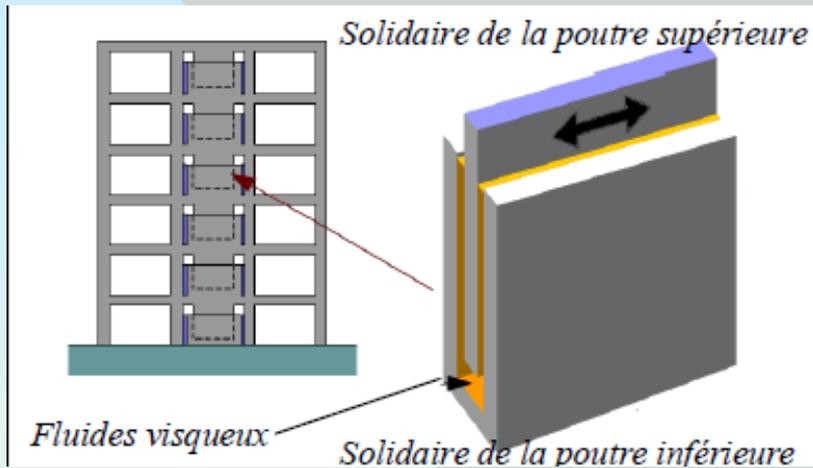
TLD (Réservoirs d'eau, mvt de l'eau)



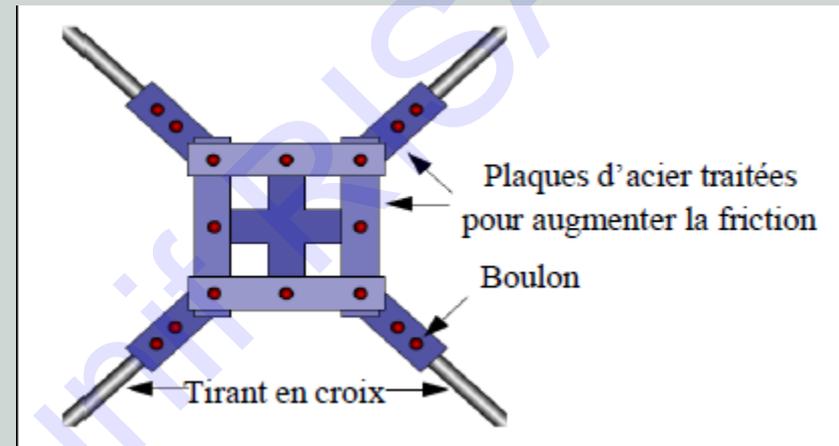
Types de TMD

Qlqs Systèmes passifs

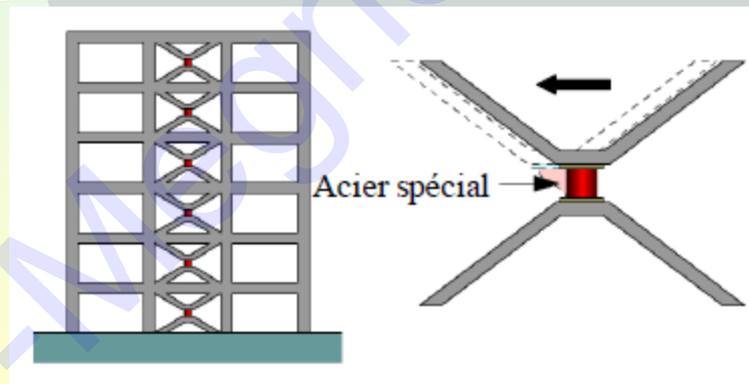
Systèmes de dissipation d'énergie passifs



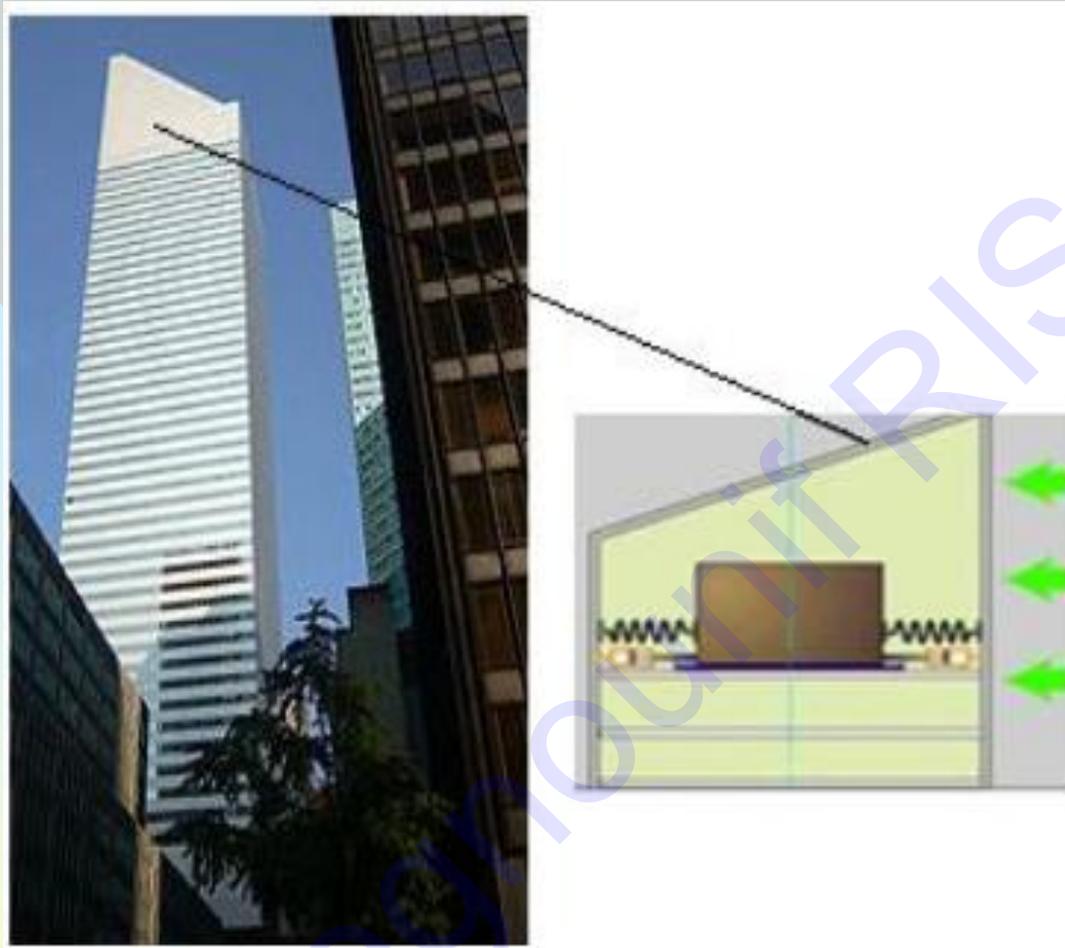
Par amortisseur visqueux
(Viscous Damper Wall)



Amortissement à friction



Amortissement hystérétique



TMD sur la tour Citicorp à New York



**TLD sur la tour
Rincon Hill à San
Francisco**

BASE ISOLATION



Figure 13
Piers with the lead-rubber bearings at Bhuj District Hospital

- Introduces flexibility to the structures
- Building is rested on flexible pads (Base Isolators)
- When earthquake strikes the building does not move
- It is suitable for hard soil only

Mass damper development

A mass damper is a vibration absorber able to attenuate significantly the vibrations of a structure or a machine.

In the graph we report the frequency response of a machine with and without mass damper. The application of a mass damper gives an important increment of the global damping.

Mass damper action



Frequency response measured on a vibrating machine



TMD on different structures

IN BRIDGES



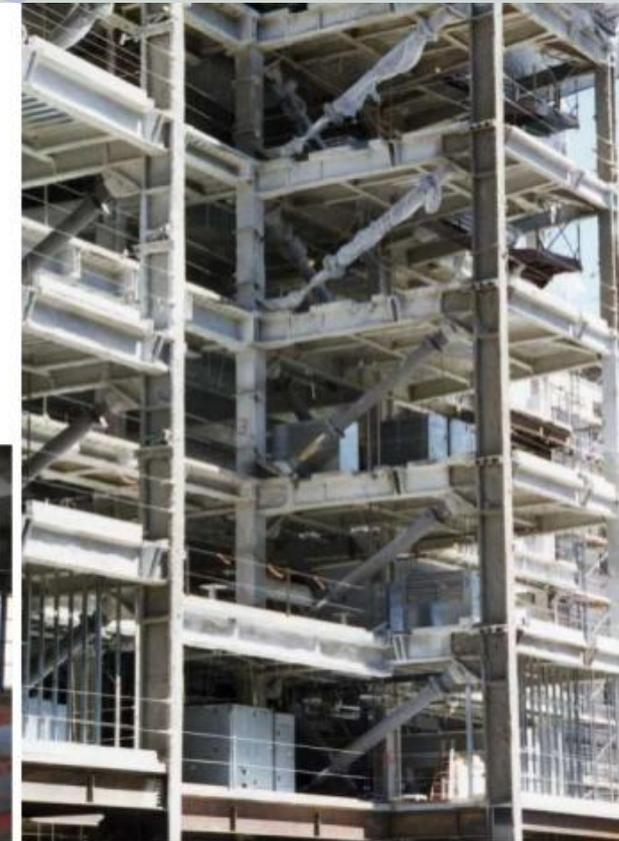
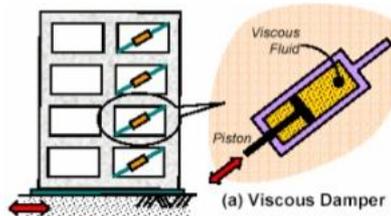
IN STADIUM





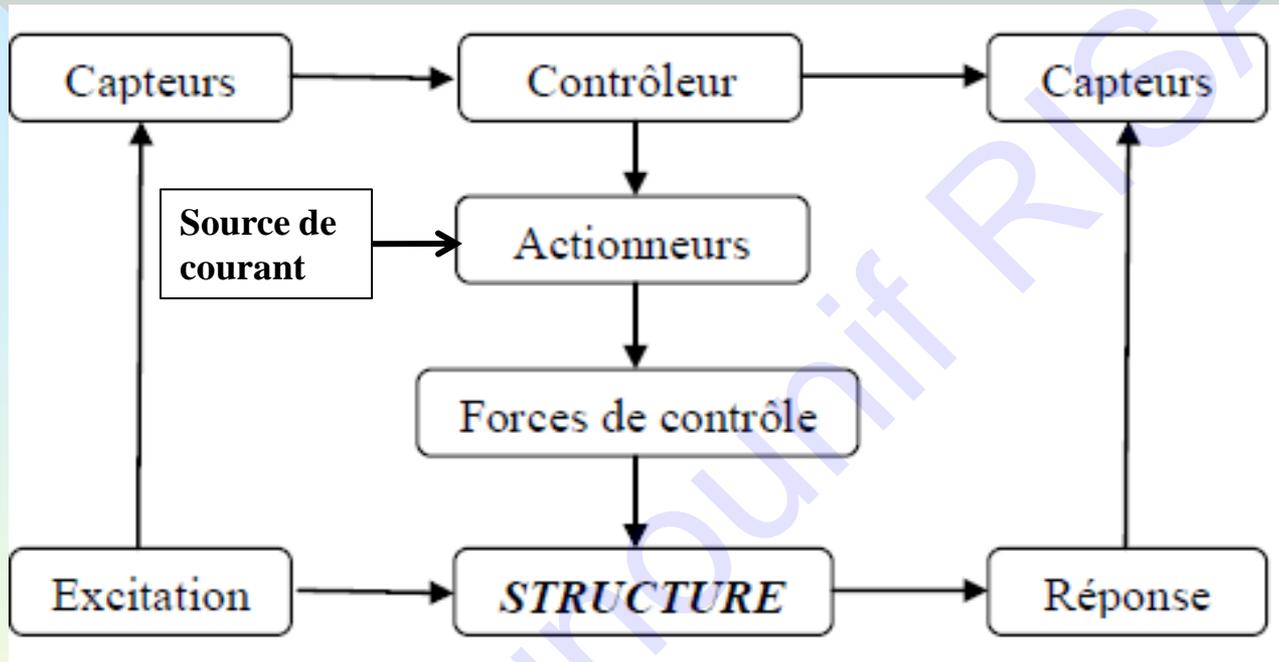
VISCOUS FLUID DAMPERS

- A viscous fluid damper consists of a hollow cylinder filled with a fluid. As the damper piston rod and piston head are stroked, the fluid flows at high velocities, resulting in the development of friction



Contrôle actif

Plus complexe que le système passif

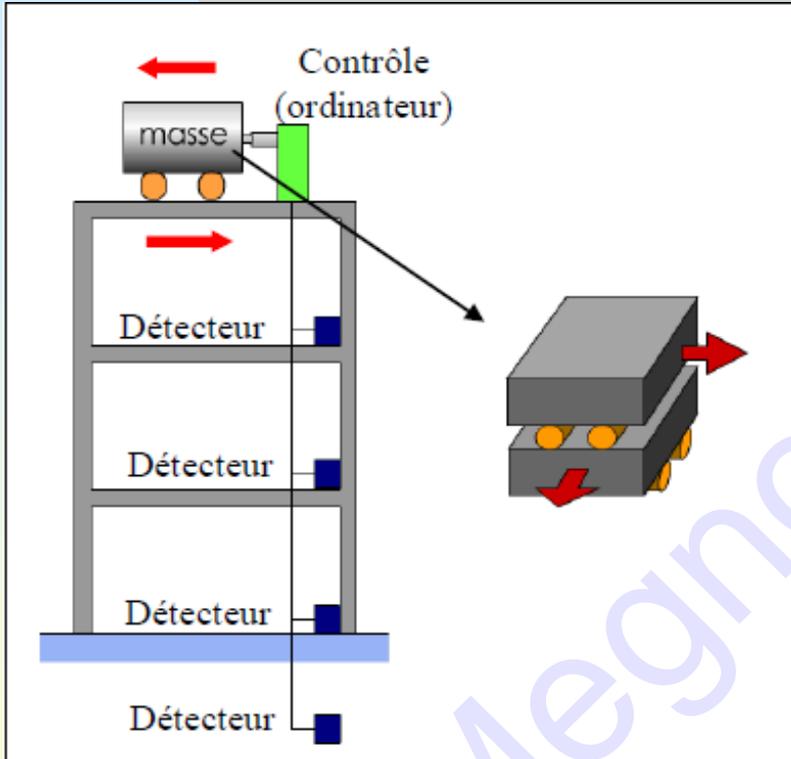


Inconvénients:

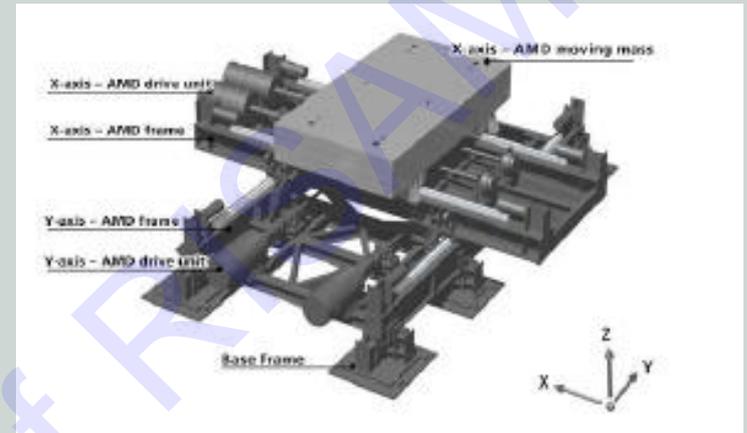
- ❑ Nécessite une alimentation externe
- ❑ Système cher à concevoir et cher à utiliser
- ❑ Prend plus d'espace que les dispositifs de contrôle passifs

Qlqs Systèmes actifs

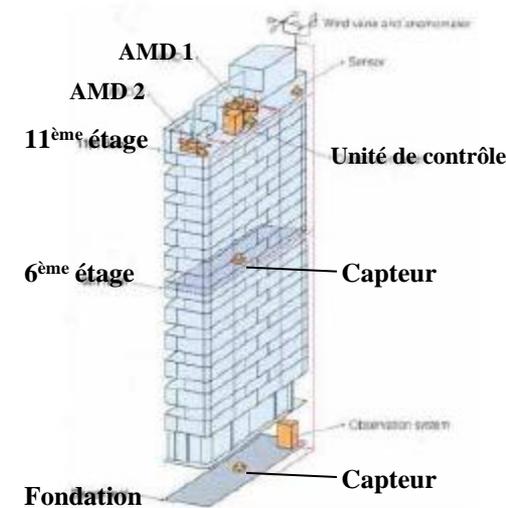
Système AMD



Structure avec AMD

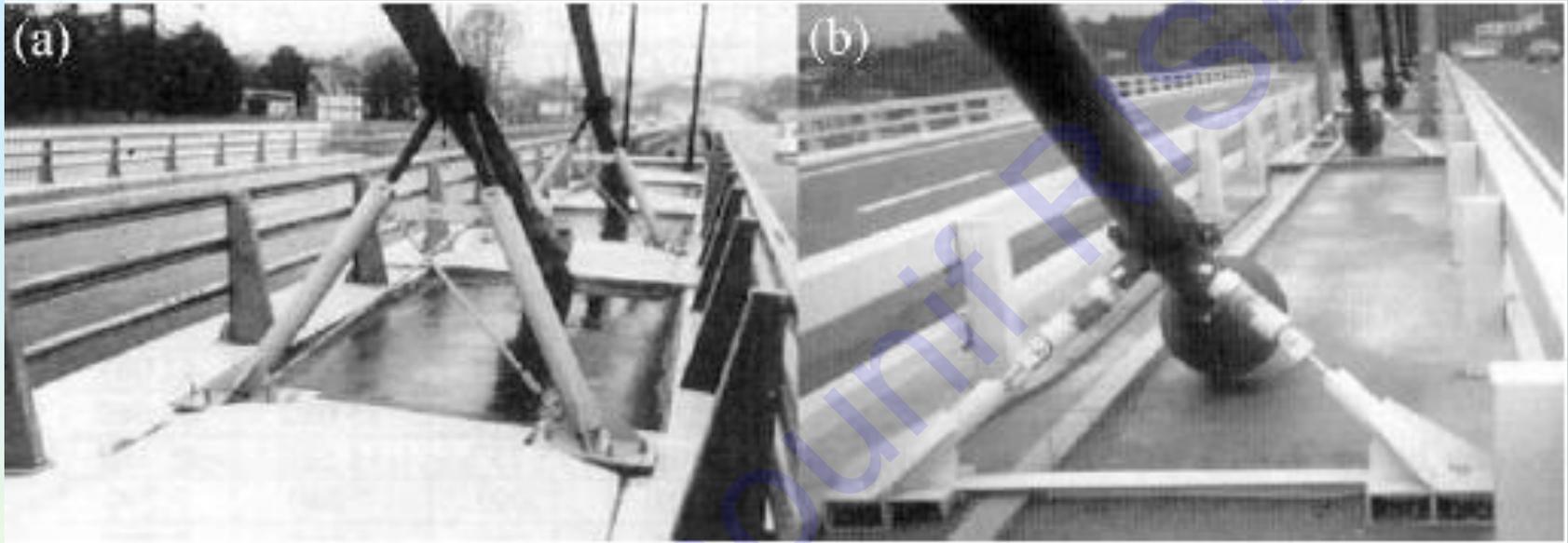


Système AMD



Bâtiment Kyobashi Seiwa Japon (1989)
4x12x33 m (11 étages)

Amortisseur à câbles actifs

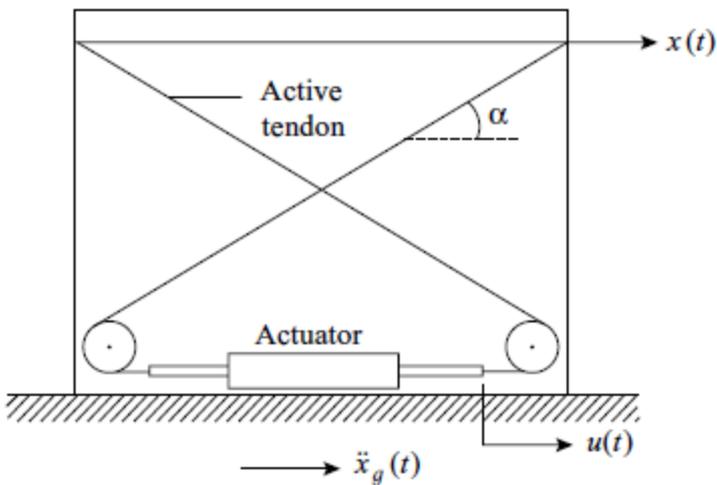


Contrôle d'un hauban à l'aide d'amortisseurs hydrauliques

- a)** Pont de l'Iroise (France)
- b)** Pont de Aratsu (Japon)

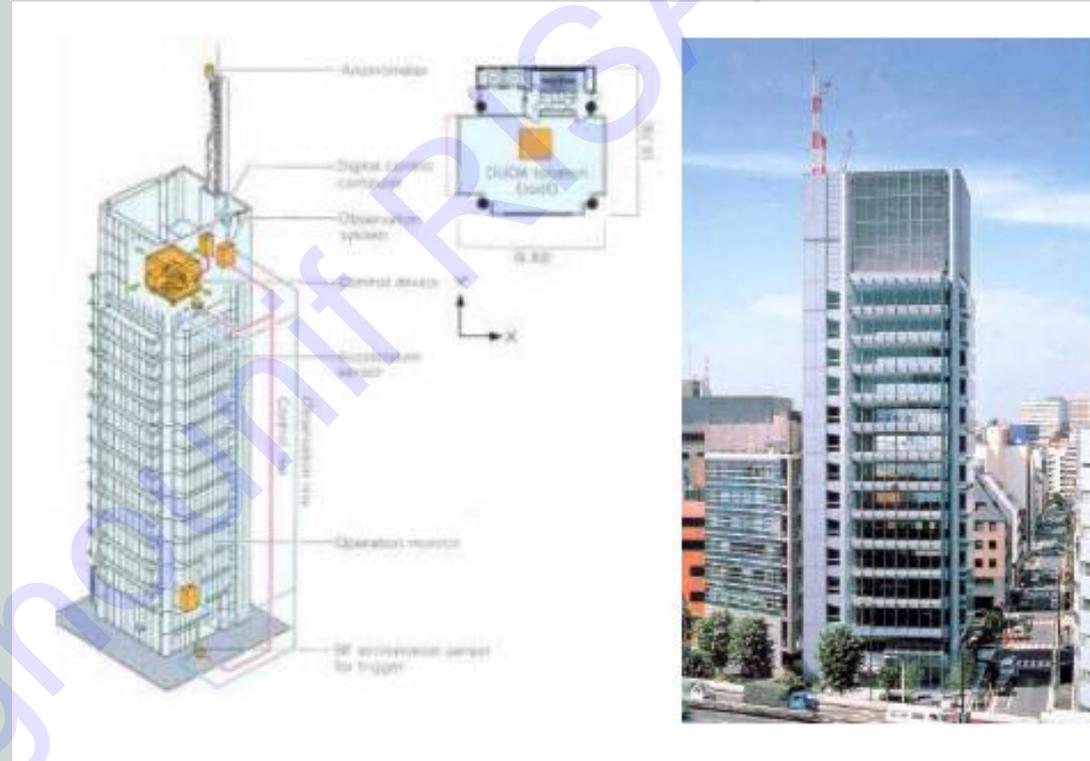
Qlqs Systèmes actifs

Système tendon actif



Ensemble de tendons précontraints dont la tension est contrôlée par des servomécanismes électrohydrauliques

Système DUOX



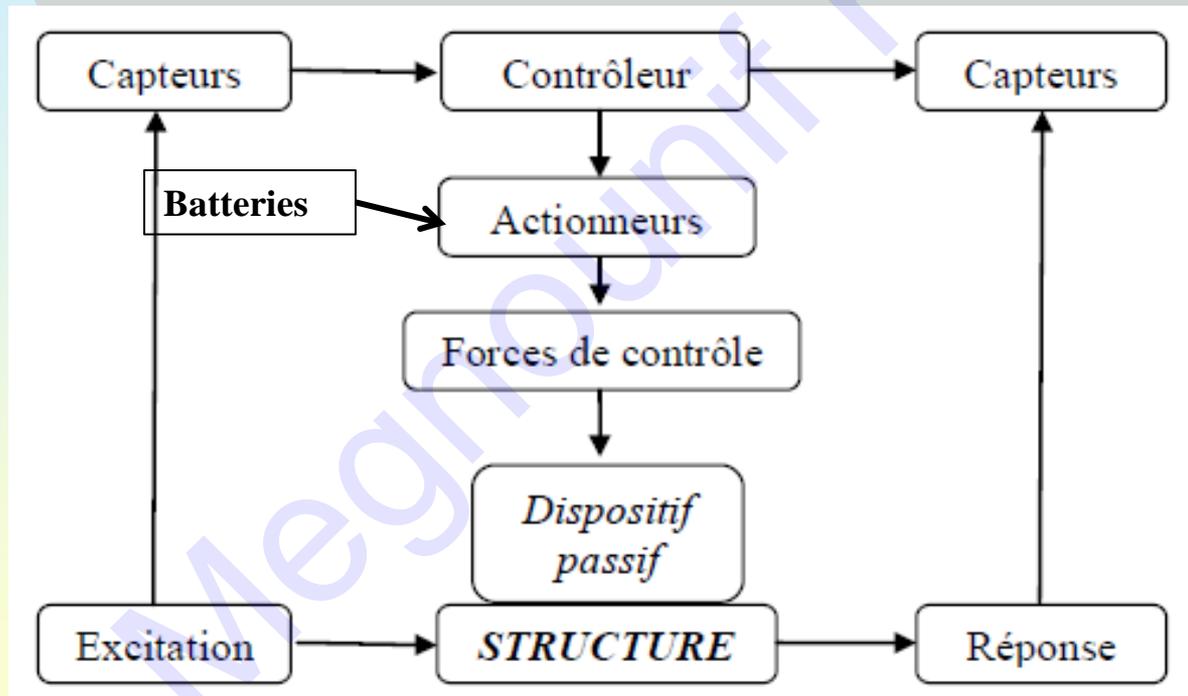
Tour Ando Nishikicho

Similaire que AMD sauf masse libre passive monté sur système actif

Contrôle semi actif

Un système de contrôle semi actif est semblable à un système actif parce que le système opère l'alimentation externe mais le dispositif de contrôle semi actif n'ajoute pas l'énergie à la structure.

Dans ce système, des mécanismes sont employés pour commander ou aider un dispositif de contrôle passif.



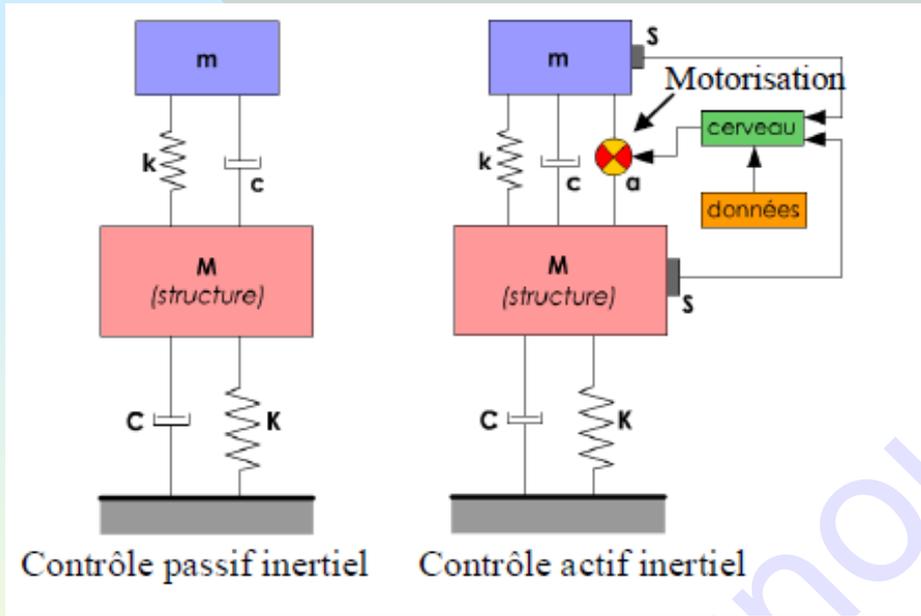
Avantage

- ❑ Ne Nécessite pas une grande alimentation externe

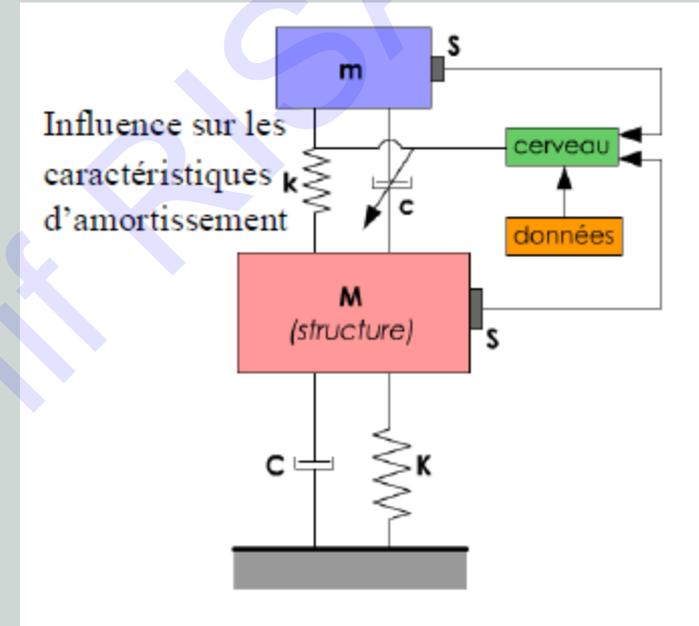


Contrôle semi actif

Comment l'avoir ?



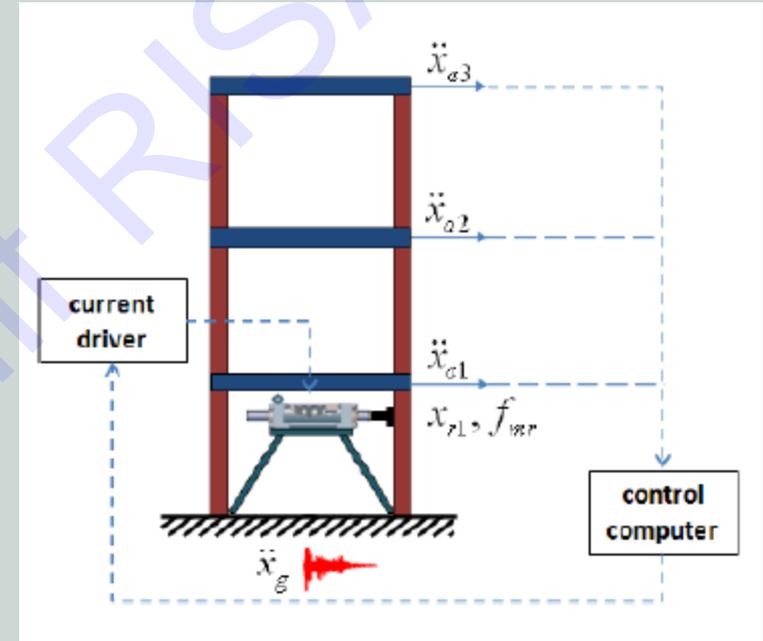
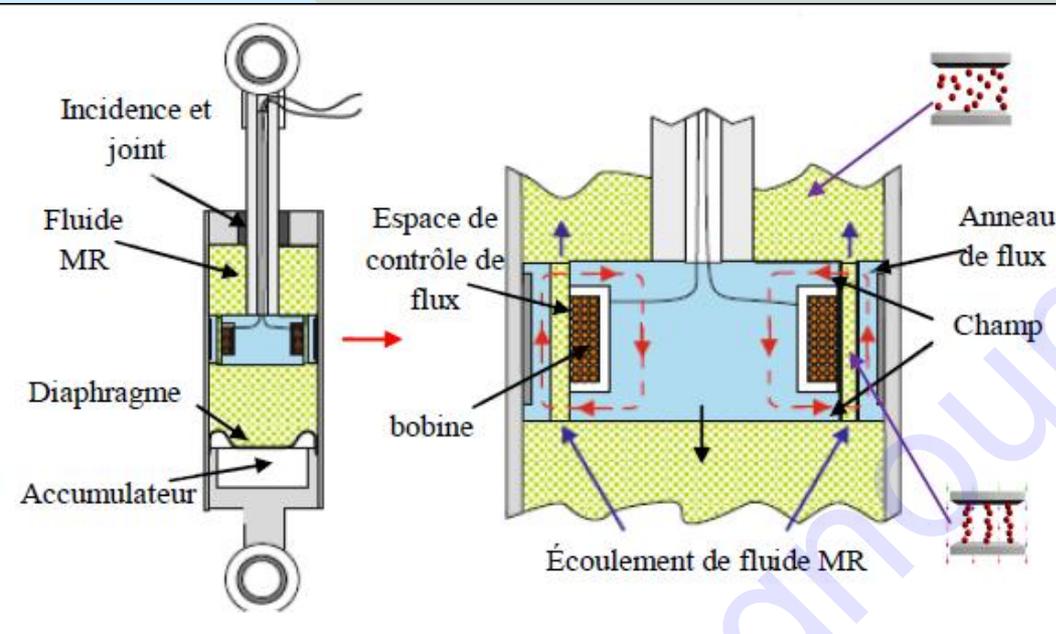
Schématisation inertielle actif et passif



Schématisation inertielle semi actif

Qlqs Systèmes semi actifs

Amortisseurs à fluides magnéto rhéologiques



Structure équipée d'un amortisseur à fluide MR

Schéma de l'amortisseur à fluide MR

La dureté de l'amortisseur dépend de la viscosité du fluide qui est contrôlée par le champ magnétique



02 amortisseurs MRD pesant chacun 30 t installés sur Nihon-Kagaku-Miraikan, musée national de Tokyo.

Installation d'amortisseurs MR sur un pont à Hauban en Croatie



Résultats indiquent que les oscillations des câbles ont été réduites par un facteur de 10.

De 2.0 m d'amplitude avant l'installation à 20 cm après.

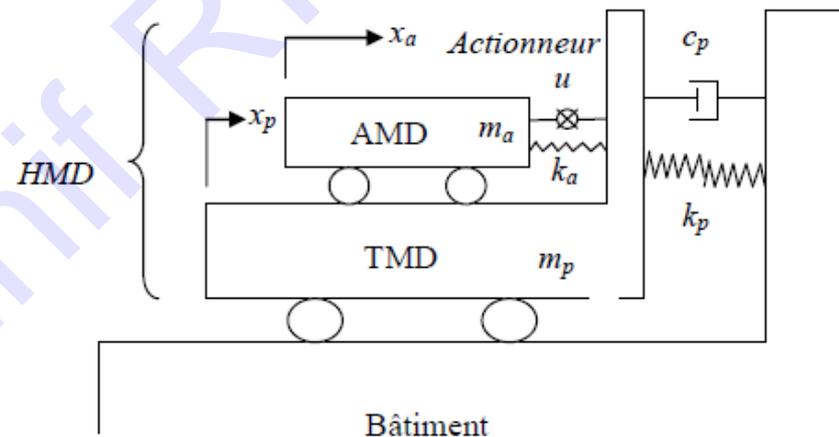
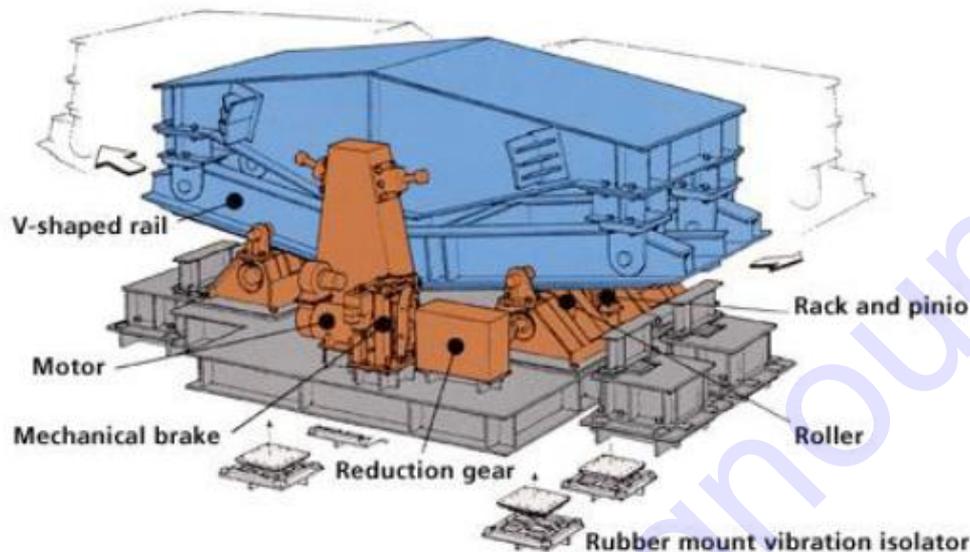
Contrôle Hybride

- ❑ Un système de contrôle hybride se réfère généralement à un système de contrôle passif et actif combinés, ce qui permet d'augmenter la fiabilité et l'efficacité globale de la structure contrôlée.
- ❑ Ce système a les avantages des deux techniques et les limites de chaque technique.
- ❑ Cette combinaison hybride de systèmes passifs et actifs s'avère être capable de réduire de moitié l'amplitude des mouvements des constructions et témoigne d'une grande fiabilité

Qlqs Systèmes hybrides

HMD (Amortisseur à masse hybride)

Combine un TMD (control passif) à un actionneur de control actif
(Ou bien AMD+TMD)



Ajout d'un AMD à un TMD

Masse du AMD est de 10% à 15% de celle du TMD

L'actionneur génère une force de commande, qui régule le TMD et augmente ainsi l'efficacité et la robustesse de l'appareil pour modifier les caractéristiques dynamiques de la structure.

TMD pour le 1^{er} mode de la structure et AMD pour les autres modes

4. Principes de base pour le contrôle de la réponse sismique

Considérons un SSDDL, soumis à une excitation sismique

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

Ou bien

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

La théorie de dynamique des structures nous donnent la solution:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (C_1 \cos \bar{\omega}_n t + C_2 \sin \bar{\omega}_n t) - \frac{1}{\bar{\omega}_n} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin \bar{\omega}_n(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

Puisque l'excitation du sol peut être exprimée en séries de Fourier, la solution peut être la somme des réponses par séries d'excitations sinusoïdales:

Pour une excitation sinusoïdale de type $P \sin \theta t$

$$x(t) = e^{-\zeta \omega_n t} (C_1 \cos \bar{\omega}_n t + C_2 \sin \bar{\omega}_n t) + \frac{P \sin(\theta t - \varphi)}{m \sqrt{(\omega_n^2 - \theta^2)^2 + 4\zeta^2 \omega_n^2 \theta^2}} \quad (4)$$

Avec: $\varphi = \tan^{-1} [2\zeta \omega_n \theta / (\omega_n^2 - \theta^2)]$.

De ces 02 dernières équations (3 et 4), on remarque qu'il ya, mathématiquement, **03 méthodes pour réduire la réponse:**

1. Réduire l'intensité de l'excitation $\ddot{x}_g(t)$.
2. Augmenter le coefficient d'amortissement ζ .
3. Eviter la résonance en augmentant la différence de ω_n et θ .



Ces concepts mathématiques se traduisent par des mécanismes de structures intelligentes, comme:

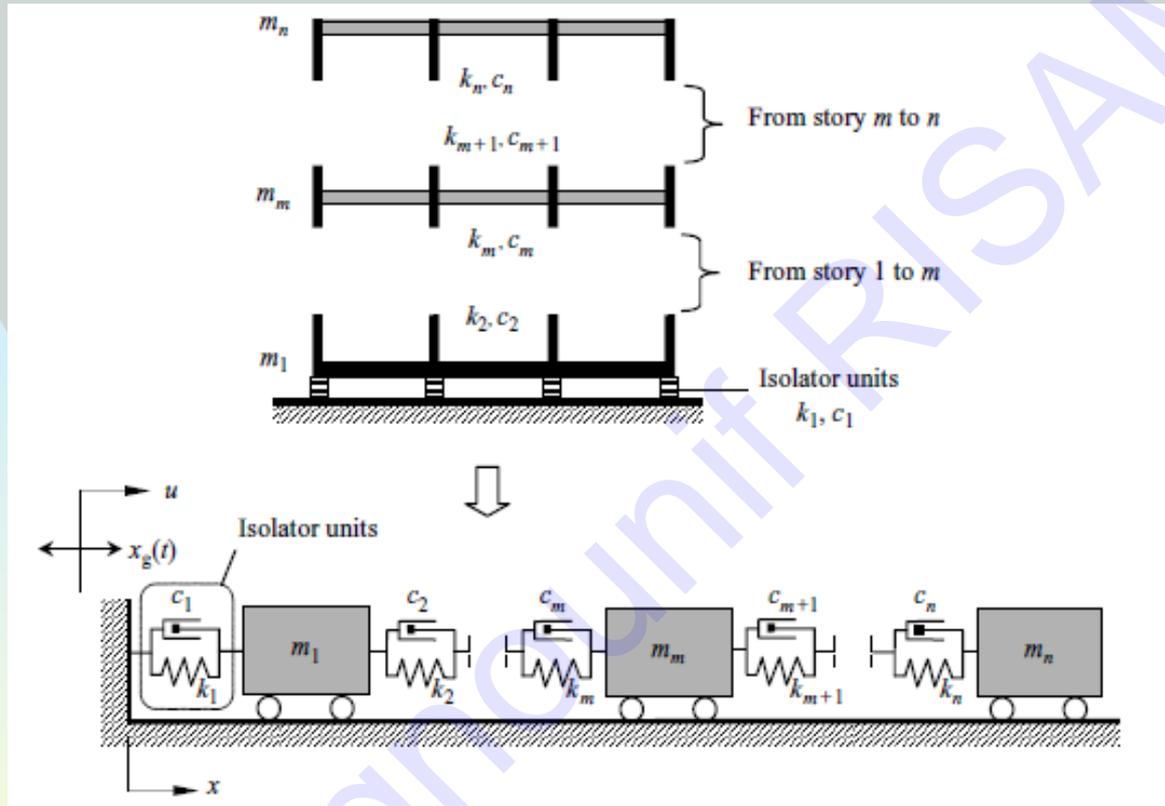
- ❑ Systèmes d'isolation de base (Passif) qui **couperent la transmission** de l'énergie de l'excitation à la structure
- ❑ Dispositifs de contrôle ou systèmes qui appliquent **une force de contrôle** qui sert comme un mécanisme extra d'amortissement comme l'amortissement masse, les tendons et les bracings...
- ❑ Dispositifs de contrôle ou systèmes qui utilisent le principe **d'absorption d'énergie** par matériaux visqueux de caractéristiques non linéaires.
- ❑ Dispositifs de contrôle ou systèmes qui permettent **d'éloigner la période** naturelle de la structure de celle de l'excitation.

Enfinement soit une isolation à la base (passif) soit ajouter un système de contrôle (actif, semi actif et hybride)



5. Systèmes d'isolation de la base

SPDDL



Equation du mouvement au niveau de la toiture « n » s'écrit:

$$m_n \ddot{u}_n + c_n (\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}) + k_n (u_n - u_{n-1}) = 0$$

(11)

5. Systèmes d'isolation de la base (suite)

De même, pour le niveau « m », l'équation du mouvement s'écrit:

$$\begin{aligned} m_m \ddot{u}_m + c_m (\dot{u}_m - \dot{u}_{m-1}) - c_{m+1} (\dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m) + k_m (u_m - u_{m-1}) \\ - k_{m+1} (u_{m+1} - u_m) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Et pour le niveau « 1 », on a:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{u}_1 + c_1 (\dot{u}_1 - \dot{x}_g) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_1 (u_1 - x_g) \\ - k_2 (u_2 - u_1) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

En posant, $x_m = u_m - x_g$, on aura le système d'équations:

$$\begin{aligned} m_n \ddot{x}_n + c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n (x_n - x_{n-1}) &= -m_n \ddot{x}_g \\ m_m \ddot{x}_m + c_m (\dot{x}_m - \dot{x}_{m-1}) - c_{m+1} (\dot{x}_{m+1} - \dot{x}_m) + k_m (x_m - x_{m-1}) \\ - k_{m+1} (x_{m+1} - x_m) &= -m_m \ddot{x}_g \\ m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) &= -m_1 \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (14)$$

5. Systèmes d'isolation de la base (suite)

En forme matricielle:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\ddot{x}_g[M]\{1\} \quad (15)$$

Avec

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & \ddots & \vdots & \\ & & & m_m & \cdots & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & \ddots & & \\ & & & & & m_{n-1} & \\ & & & & & & m_n \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ & c_2 + c_3 & 0 & 0 & 0 \\ & & \ddots & \vdots & \\ & & & c_m + c_{m+1} & \cdots & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & \ddots & & \\ & & & & & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & & & & c_n \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ & k_2 + k_3 & 0 & 0 & 0 \\ & & \ddots & \vdots & \\ & & & k_m + k_{m+1} & \cdots & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & \ddots & & \\ & & & & & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & & & & & k_n \end{bmatrix}$$

5. Systèmes d'isolation de la base (suite)

Par décomposition modale, on obtient des équations indépendantes pour chaque mode::

$$\ddot{x}'_m + 2\beta_m\omega_m\dot{x}'_m + \omega_m^2x'_m = -\Gamma_m\ddot{x}_g = -\frac{\{\Phi\}_m^T[M]\{1\}}{\{\Phi\}_m^T[M]\{\Phi\}_m}\ddot{x}_g \quad (16)$$

Dont la solution est:

$$x'_m(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_m}\Gamma_m \int_0^t \ddot{x}_g(\tau)e^{-\beta_m\omega_m(t-\tau)} \sin \bar{\omega}_m(t-\tau) d\tau \quad m = 1, \dots, n \quad (17)$$

Ou, pour : $\bar{\omega}_m \approx \omega_m$,

$$x'_m(t) = -\frac{1}{\omega_m}\Gamma_m \int_0^t \ddot{x}_g(\tau)e^{-\beta_m\omega_m(t-\tau)} \sin \omega_m(t-\tau) d\tau \quad m = 1, \dots, n \quad (18)$$

Enfin:

$$\begin{aligned} \{\dot{x}\} &= [\Phi]\{\dot{x}'\} \\ \{\ddot{x}\} &= [\Phi]\{\ddot{x}'\} \end{aligned} \quad (19)$$



5. Systèmes d'isolation de la base

(Comportement non linéaire)

C'est très rare que le comportement est linéaire, il est souvent non linéaire.

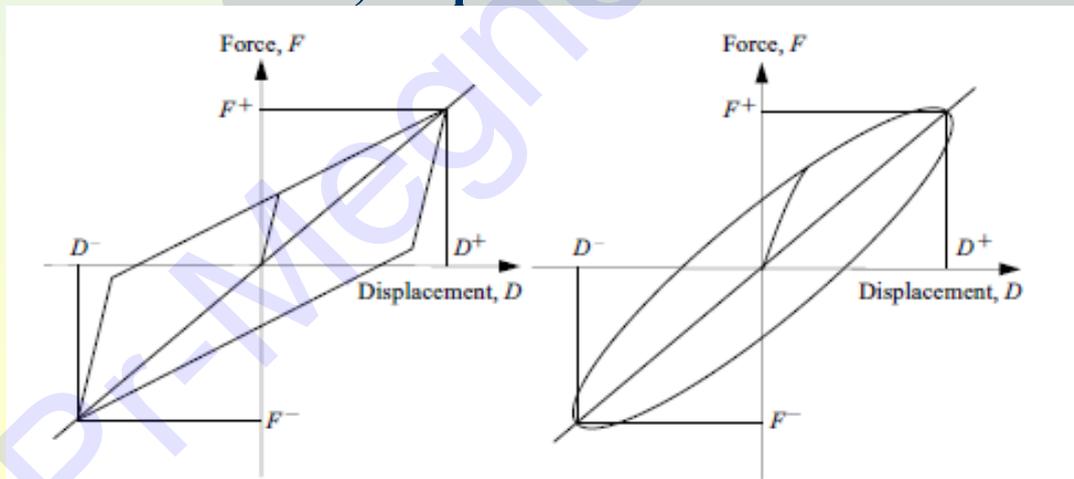
02 sources de non linéarité:

1. Réponse non linéaire

2. Système d'isolation non linéaire

Des 02, généralement c'est le système d'isolation qui est fortement non linéaire.

Plusieurs modèles existent, les plus connus:

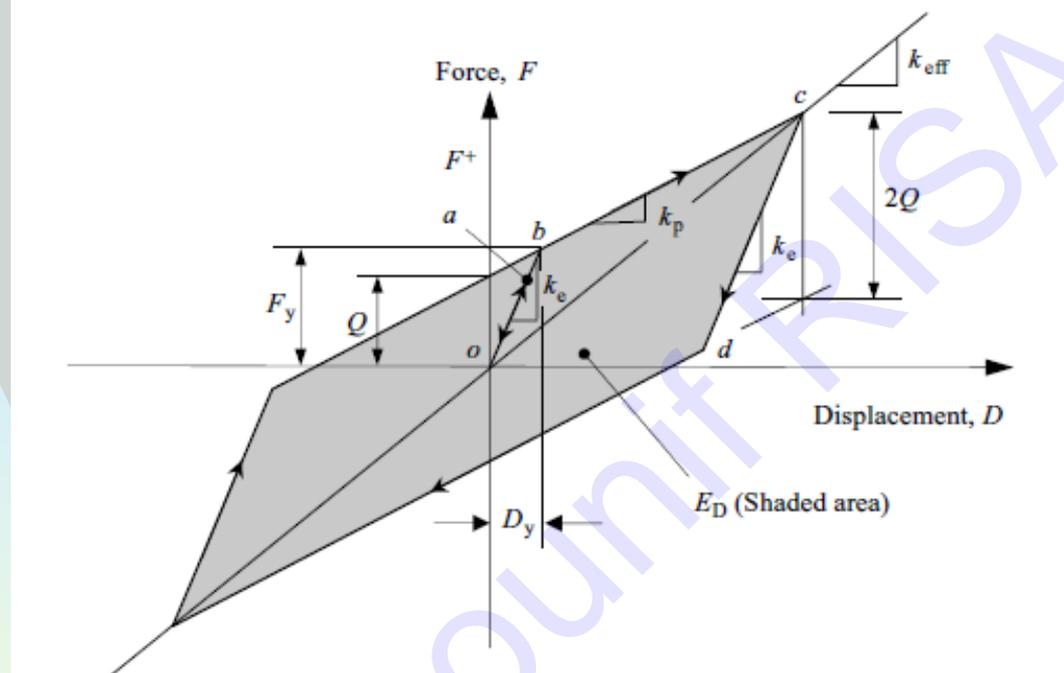


Hystérétique

Visco élastique



5. Systèmes d'isolation de la base (exemple modèle bilinéaire)



Paramètres connus: k_e , k_p et Q (résistance caractéristiques)

Avec: $k_{\text{eff}} = k_p + \frac{Q}{D}$ Rigidité effective de l'isolateur au post yield

Et l'amortissement effectif, sera:

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi k_{\text{eff}} D^2} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi k_{\text{eff}} D^2}$$

Ces valeurs sont généralement calculées au déplacement de design D_D et déplacement maximum D_M

5. Systèmes d'isolation de la base

(Modélisation par SAP2000 ou ETABS)

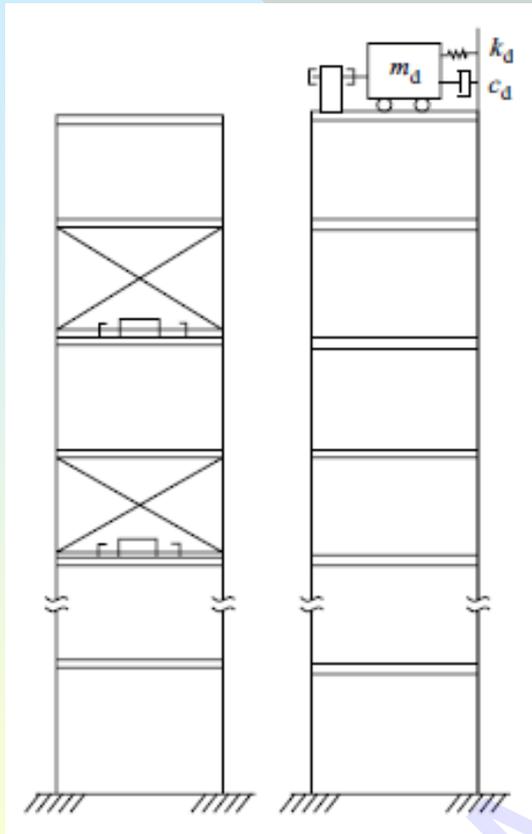
Des éléments de connexion existent pour ce type de modélisation ([link element](#))

Exemple

ETABS :
ISOLATOR1 pour modèle de type élastomère
ISOLATOR2 pour pendule à friction

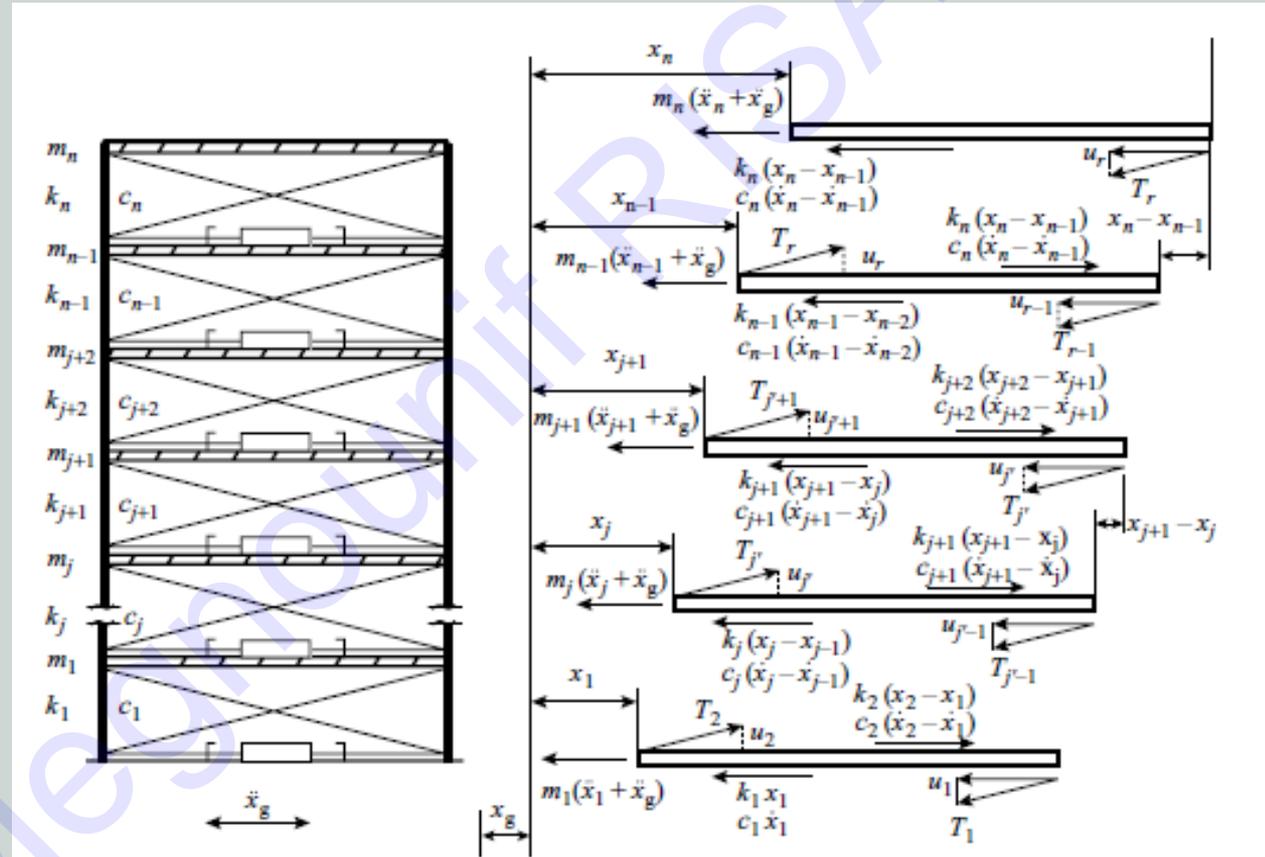
6. Contrôle actif

6.1 Structures intelligentes avec contrôle à tendon actif



Contrôle par Tendon actif

Contrôle par AMD



Modèle d'une structure à « n » étages avec « r » tendons actifs

6.1 Structures intelligentes avec contrôle à tendon actif

Le système d'équations sera:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + c_1\dot{x}_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ + k_1x_1 - k_2(x_2 - x_1) = -u_1 + u_2 \\ \dots \\ m_i(\ddot{x}_i + \ddot{x}_g) + c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \\ + k_i(x_i - x_{i-1}) - k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) = -u_j + u_{j+1} \\ m_{i+1}(\ddot{x}_{i+1} + \ddot{x}_g) + c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) - c_{i+2}(\dot{x}_{i+2} - \dot{x}_{i+1}) \\ + k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) - k_{i+2}(x_{i+2} - x_{i+1}) = -u_{j+1} + u_{j+2} \\ \dots \\ m_{n-1}(\ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_g) + c_{n-1}(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) - c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) \\ + k_{n-1}(x_{n-1} - x_{n-2}) - k_n(x_n - x_{n-1}) = -u_{r-1} + u_r \\ m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_g) + c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n(x_n - x_{n-1}) = -u_r \end{array} \right. \quad (20)$$

u_j ($j=1..r$): force de contrôle horizontale

m_i , c_i et k_i ($i=1..n$): masse, amortissement et rigidité de l'étage « i »

\ddot{x}_g : accélération du sol

x_i le déplacement relatif de l'étage « i »



6.1 Structures intelligentes avec contrôle à tendon actif

Sous forme matricielle:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = [\gamma]\{u(t)\} + \{\delta\}\ddot{x}_g(t) \quad (21)$$

Avec

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & \\ & m_2 & & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & m_i & & \\ & & & & \dots & \\ & & & & & m_{n-1} \\ & & & & & & m_n \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & & & & \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & & & \\ & & \dots & & & \\ & -c_i & (c_i + c_{i+1}) & -c_{i+1} & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & -c_{n-1} & (c_{n-1} + c_n) & -c_n \\ & & & & & -c_n & c_n \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & & & & \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & -k_i & (k_i + k_{i+1}) & -k_{i+1} \\ & & & & \dots & \\ & & & & -k_{n-1} & (k_{n-1} + k_n) & -k_n \\ & & & & & -k_n & k_n \end{bmatrix}$$

$$\{\delta\} = [-m_1, -m_2, \dots, -m_i, \dots, -m_n]^T$$

$$\{x(t)\} = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)]^T$$

$$\{u(t)\} = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_j(t), \dots, u_r(t)]^T$$

6.1 Structures intelligentes avec contrôle à tendon actif

Si on a seulement « r » tendons, le vecteur de forces de contrôle sera (rx1), et :

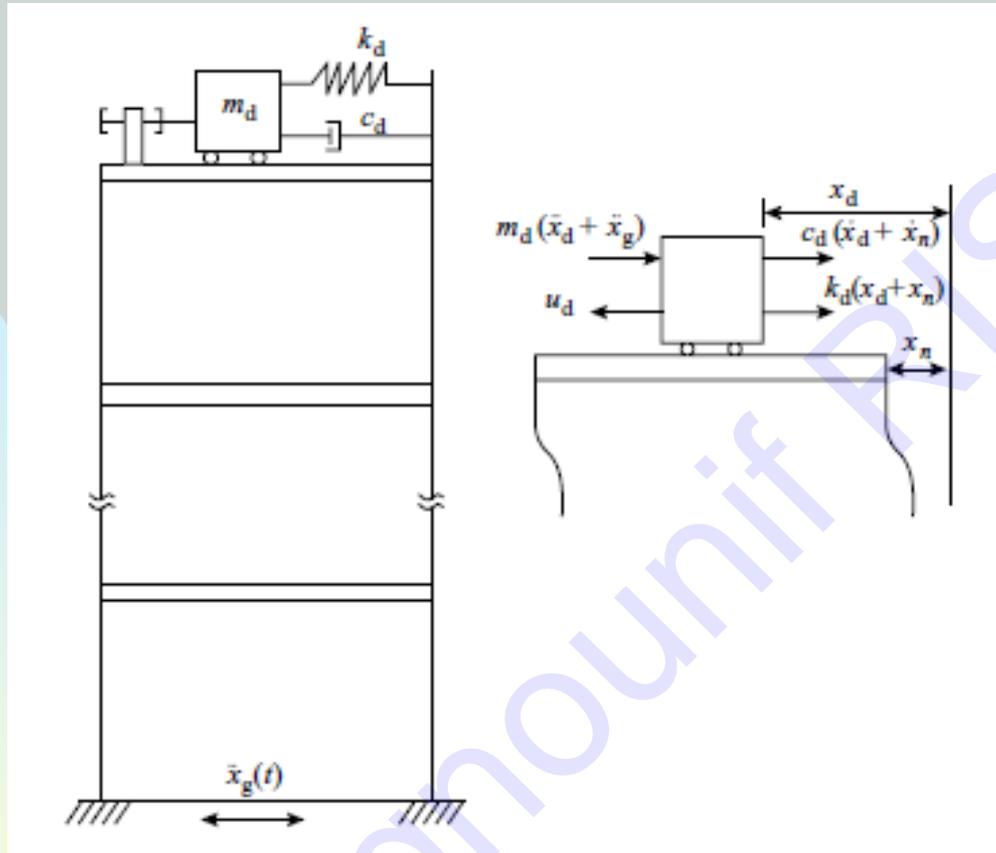
$$\begin{aligned}
 \{\bar{u}(t)\}_{n \times 1} &= \{u_1(t), u_2(t), \dots, 0, \dots, u_i(t), \dots, 0, \dots, u_{r-1}(t), u_r(t)\}^T \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{n \times r} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_{r-1}(t) \\ u_r(t) \end{Bmatrix}_{r \times 1} \\
 &= [\theta]_{n \times r} \{u(t)\}_{r \times 1}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Et, la matrice de location sera :

$$[\gamma]_{n \times r} = [\bar{\gamma}]_{n \times n} [\theta]_{n \times r} \tag{25}$$



6.2 Structures intelligentes avec contrôle à AMD



Contrôle par AMD appliqué
seulement au sommet

6.2 Structures intelligentes avec contrôle à AMD

L'équation de la structure sera:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = -m_1 \ddot{x}_g \\ \dots \\ m_i \ddot{x}_i + c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - c_{i+1} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \\ + k_i (x_i - x_{i-1}) - k_{i+1} (x_{i+1} - x_i) = -m_i \ddot{x}_g \\ m_{i+1} \ddot{x}_{i+1} + c_{i+1} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) - c_{i+2} (\dot{x}_{i+2} - \dot{x}_{i+1}) \\ + k_{i+1} (x_{i+1} - x_i) - k_{i+2} (x_{i+2} - x_{i+1}) = -m_{i+1} \ddot{x}_g \\ \dots \\ m_{n-1} \ddot{x}_{n-1} + c_{n-1} (\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) - c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) \\ + k_{n-1} (x_{n-1} - x_{n-2}) - k_n (x_n - x_{n-1}) = -m_{n-1} \ddot{x}_g \\ m_n \ddot{x}_n + c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n (x_n - x_{n-1}) = -u_d - m_n \ddot{x}_g \end{array} \right. \quad (26)$$

Et celle de l'AMD sera:

$$m_d \ddot{x}_d + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_n) + k_d (x_d - x_n) = u_d - m_d \ddot{x}_g \quad (27)$$

6.2 Structures intelligentes avec contrôle à AMD

Sous forme matricielle:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{\gamma\}u(t) + \{\delta\}\ddot{x}_g(t) \quad (28)$$

Avec

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & \\ & m_2 & & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & m_i & & \\ & & & & \dots & \\ & & & & & m_n \\ & & & & & & m_d \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & & & & \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & & & \\ & \dots & & & & \\ & & -c_i & (c_i + c_{i+1}) & -c_{i+1} & \\ & & & \dots & & \\ & & & & -c_{n-1} & (c_{n-1} + c_n) & -c_n \\ & & & & & -c_n & c_n \\ & & & & & & -c_d & c_d \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & & & & \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & & & \\ & \dots & & & & \\ & & -k_i & (k_i + k_{i+1}) & -k_{i+1} & \\ & & & \dots & & \\ & & & & -k_{n-1} & (k_{n-1} + k_n) & -k_n \\ & & & & & -k_n & k_n \\ & & & & & & -k_d & k_d \end{bmatrix}$$

et

$$\{\gamma\} = [0, 0, \dots, 0, -1, 1]^T$$

$$\{\delta\} = [-m_1, -m_2, \dots, -m_{n-1}, -m_n, -m_d]^T$$

6.3 Représentation en variables d'état

De l'équation de mvt:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = [\gamma]\{u(t)\} + \{\delta\}\ddot{x}_g(t)$$

On peut tirer

$$\begin{aligned}\{\ddot{x}(t)\} = & -[M]^{-1}[C]\{\dot{x}(t)\} - [M]^{-1}[K]\{x(t)\} \\ & + [M]^{-1}[\gamma]\{u(t)\} + [M]^{-1}\{\delta\}\ddot{x}_g(t)\end{aligned}\quad (29)$$

Qui peut être écrite sous la forme

$$\begin{aligned}\begin{Bmatrix} \{\dot{x}(t)\} \\ \{\ddot{x}(t)\} \end{Bmatrix} = & \left[\begin{array}{c|c} [0] & [I] \\ \hline -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [0] \\ [M]^{-1}[\gamma] \end{Bmatrix} \{u(t)\} \\ & + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [M]^{-1}\{\delta\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g(t)\end{aligned}\quad (30)$$

6.3 Représentation en variables d'état

En utilisant le vecteur d'état:

$$\{Z(t)\} = \begin{Bmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{Bmatrix}$$

On obtient

$$\{\dot{Z}(t)\} = [A]\{Z(t)\} + [B_u]\{u(t)\} + \{B_r\}\ddot{x}_g(t) \quad (31)$$

Avec

$$\{\dot{Z}(t)\} = \begin{Bmatrix} \{\dot{x}(t)\} \\ \{\ddot{x}(t)\} \end{Bmatrix}_{2n \times 1}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$[B_u] = \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1}[\gamma] \end{bmatrix}_{2n \times r}$$

$$\{B_r\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [M]^{-1}\{\delta\} \end{Bmatrix}_{2n \times 1}$$

$[A]$ est la matrice caractéristique du système contrôlé

(32)

Les C.I

$$\{Z(0)\} = \{0\}, \quad \{u(0)\} = \{0\}, \quad \text{and} \quad \ddot{x}_g(0) = 0$$

6.3 Représentation en variables d'état

L'équation

$$\{\dot{Z}(t)\} = [A]\{Z(t)\} + [B_u]\{u(t)\} + \{B_r\}\ddot{x}_g(t)$$

a « $2n$ » équations et « $(2n+r)$ » inconnues ($2n \times 1$ pour $Z(t)$ et $(r \times 1)$ pour $u(t)$)

Il faut donc, « r » équations supplémentaires pour la résolution.

Ces équations sont définies par la loi de contrôle feedback.

Exemple, pour la cas du contrôle actif à boucle fermée (feedback), le vecteur force de contrôle peut être défini par:

$$\{u(t)\}_{r \times 1} = -[G]_{r \times 2n} \{Z(t)\}_{2n \times 1} \quad (34)$$

$[G]$ appelée matrice de gain, qu'il faut déterminer

Avec, ces équations supplémentaires, le système sera: $\{\dot{Z}(t)\} = [A_c]\{Z(t)\} + \{B_r\}\ddot{x}_g(t)$

$$\begin{aligned} [A_c] &= [A] - [B_u][G] \\ &= \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1}[\gamma] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [G_d] & [G_v] \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}([K] + [\gamma][G_d]) & -[M]^{-1}([C] + [\gamma][G_v]) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Où:



6.3 Représentation en variables d'état

Algorithme de résolution

$$\{\dot{Z}(t)\} = [A]\{Z(t)\} + [B_u]\{u(t)\} + \{B_r\}\ddot{x}_g(t)$$

On suppose $\{Z(t)\} = [T]\{\psi(t)\}$ (35)

Où [T] représente la matrice modale de la matrice [A]

$$[T] = [\{\alpha_1\}, \{\beta_1\}; \{\alpha_2\}, \{\beta_2\}; \dots; \{\alpha_j\}, \{\beta_j\}; \dots; \{\alpha_n\}, \{\beta_n\}]$$
 (36)

$\{\alpha_j\}$ Partie réelle du vecteur propre « j » de [A]

$\{\beta_j\}$ Partie imaginaire du vecteur propre « j » de [A]

Après transformation, on obtient l'équation d'état modale

$$\{\dot{\psi}(t)\} = [\Phi]\{\psi(t)\} + \{\Gamma(t)\}$$
 (37)

avec $[\Phi] = [T]^{-1}[A][T]$ et $\{\Gamma(t)\} = [T]^{-1}[B_u]\{u(t)\} + [T]^{-1}\{B_r\}\ddot{x}_g(t)$

La solution peut être obtenue par l'intégrale (méthode des trapèzes par ex)

$$\{\psi(t)\} = \int_0^T \exp([\Phi](t - \tau))\{\Gamma(\tau)\} d\tau$$

6.4 Algorithmes de contrôle

La détermination de la matrice $[G]$, pour le calcul du vecteur de force de contrôle, se fera selon l'algorithme de contrôle choisi.

Algorithmes de contrôle actif

```
graph TD; A[Algorithmes de contrôle actif] --> B[Algorithmes classiques]; A --> C[Algorithmes développés]; B --- D["■ ROAC (Ricatti Optimal Active control)"]; B --- E["■ Placement de pole"]; C --- F["■ IOAC (Instantaneous optimal active control)"]; C --- G["■ GOAC (General optimal active control)"];
```

Algorithmes classiques

- ROAC (Ricatti Optimal Active control)
- Placement de pole

Algorithmes développés

- IOAC (Instantaneous optimal active control)
- GOAC (General optimal active control)

6.4 Algorithmes de contrôle

Le principe repose sur l'utilisation de l'indice de performance pour trouver un compromis entre le besoin de **réduire la réponse structurelle** et le besoin de **minimiser la force de contrôle**.

L'indice de performance

ROAC	$J = J_1[Z(t_0), Z(t_f), t_0, t_f] + \int_{t_0}^{t_f} J_2(Z, \dot{Z}, U, \dot{U}, t) dt$ <p>Il faut donc minimiser $J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{u(t)\}^T [R] \{u(t)\}) dt$</p>
IOAC	<p>Il faut donc minimiser</p> $J(t) = \{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\}$
GOAC	$J = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (\{Z(t)\}^T [Q] \{Z(t)\} + \{U(t)\}^T [R] \{U(t)\}) dt$

La matrice de gain du contrôle

<i>ROAC</i>	$[G] = [R]^{-1} [B_u]^T [P(t)]$
<i>IOAC</i>	$[G] = \left(\frac{\Delta t}{2} \right) [R]^{-1} [B_u]^T [Q]$
<i>GOAC</i>	$[G] = [R]^{-1} [B_u]^T [S]$

[P] est obtenue en résolvant l'équation algébrique (ARE) de Riccati

$$[P][A] + [A]^T [P] - [P][B_u][R]^{-1} [B_u]^T [P] + [Q] = 0$$

[R] matrice représentant l'effectivité des forces de contrôle

[Q] est liée au vecteur déplacement d'état

[R] et **[Q]** sont des matrices poids pour balancer entre l'effet de la réponse et celle de la force de contrôle.



7. Applications

Pr-Meghnoun PRISAM

- Une structure à 06 étages

Les caractéristiques du modèle :

1ère Etage : $M_1=109.78 \text{ ton}$; $K_1=351284 \text{ KN/m}$; $W_1=9.79 \text{ rad/s}$

2ème Etage : $M_2=109.62 \text{ ton}$; $K_2=225167 \text{ KN/m}$; $W_2=24.05 \text{ rad/s}$

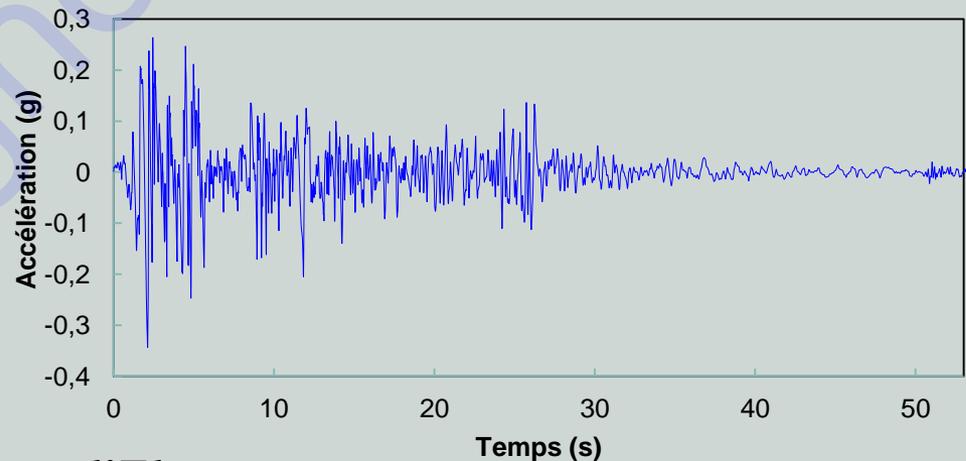
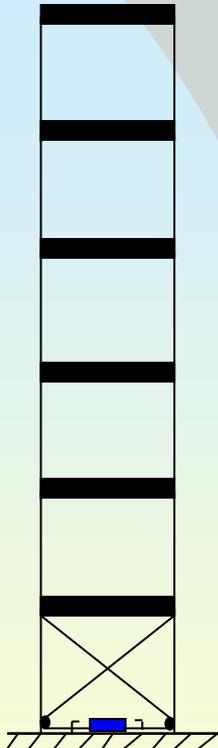
3ème Etage : $M_3=109.24 \text{ ton}$; $K_3=169665 \text{ KN/m}$; $W_3=37.40 \text{ rad/s}$

4ème Etage : $M_4=108.86 \text{ ton}$; $K_4=124242 \text{ KN/m}$; $W_4=49.56 \text{ rad/s}$

5ème Etage : $M_5=108.48 \text{ ton}$; $K_5=87872 \text{ KN/m}$; $W_5=63.44 \text{ rad/s}$

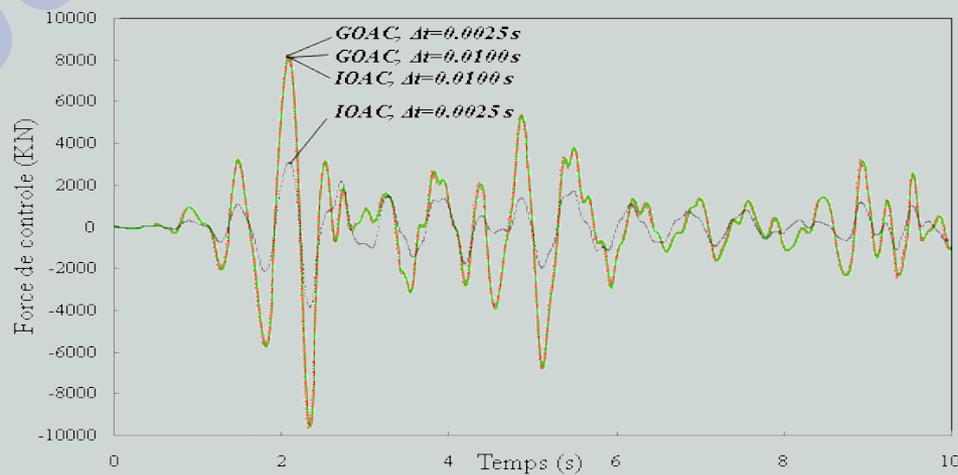
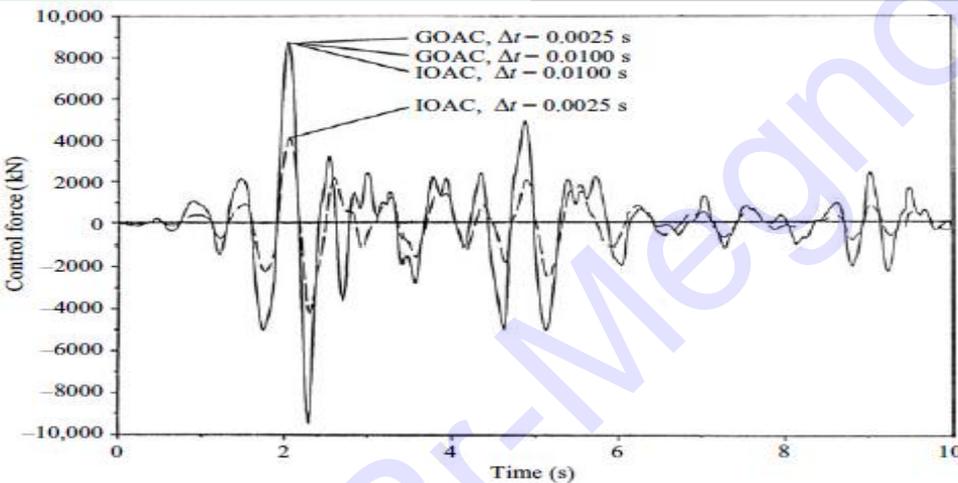
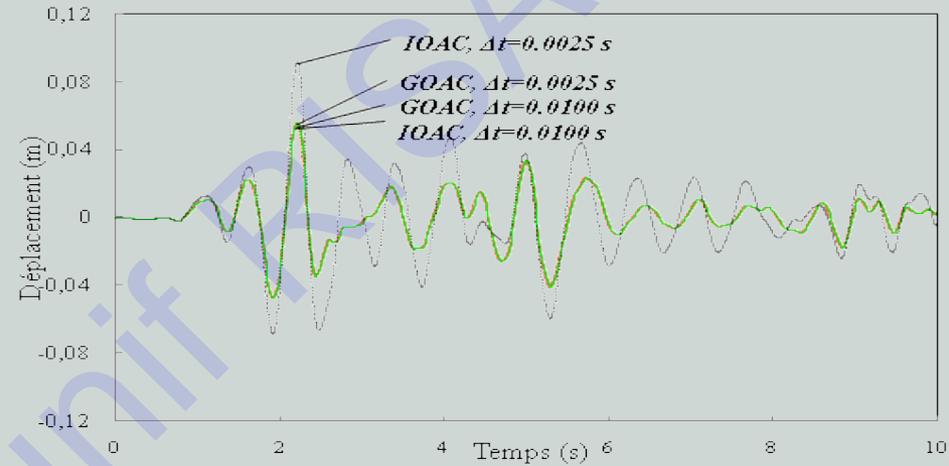
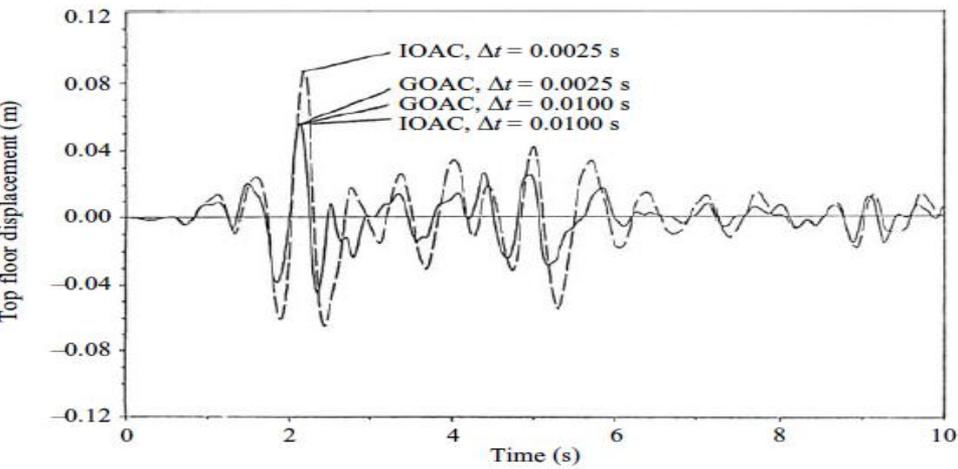
6ème Etage : $M_6=107.03 \text{ ton}$; $K_6=59532 \text{ KN/m}$; $W_6=83.76 \text{ rad/s}$

Les amortissements $\beta=2\%$



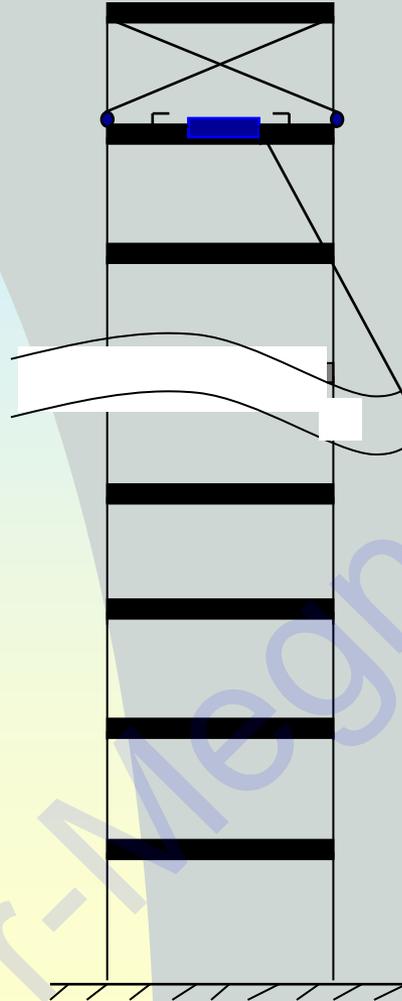
Séisme d'El-centro

Une structure à 06 étages



Effet de l'incrément du temps

Les données



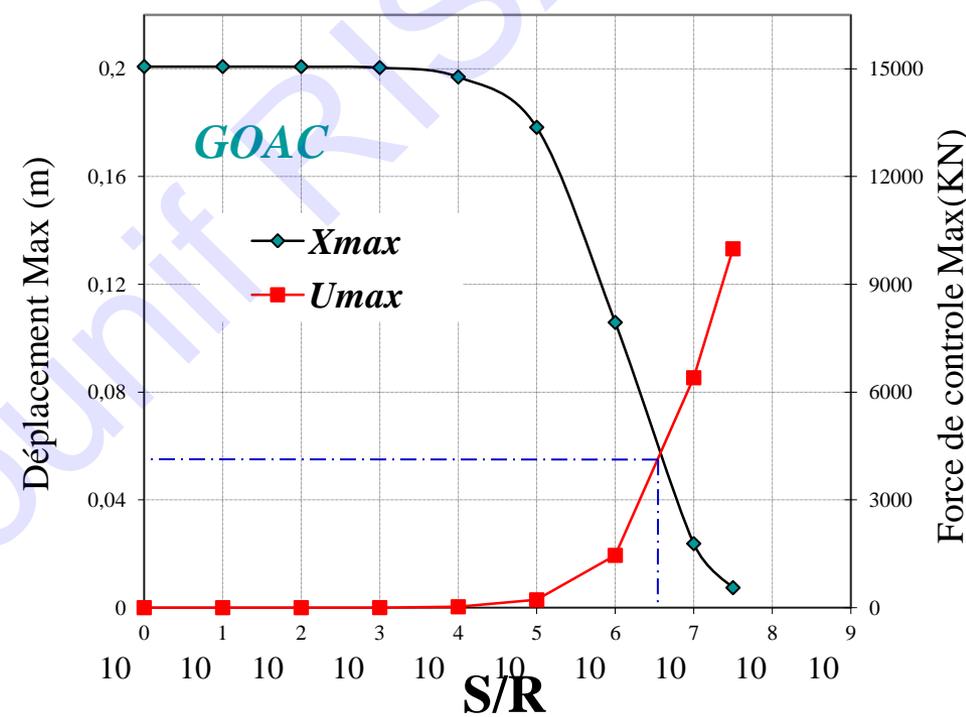
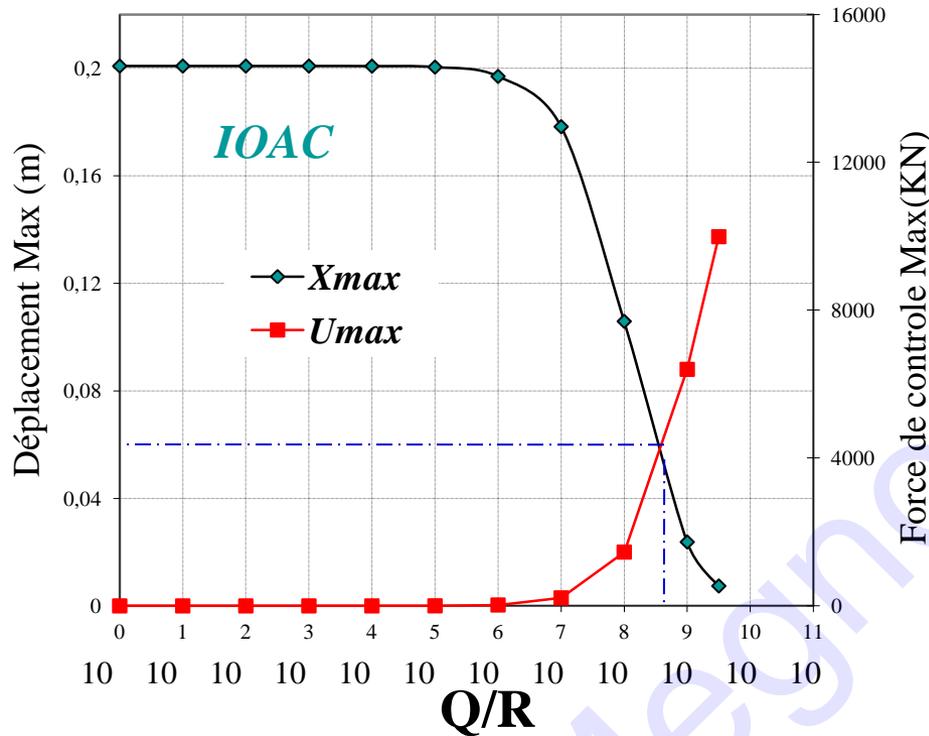
$$M_i = 350.262 \text{ ton } (i=1, \dots, 15)$$

$$K_i = 5.224 \times 10^5 \text{ KN/m } (i=1, \dots, 15)$$

Les amortissements : $\beta = 3\%$

1 Tendon actif

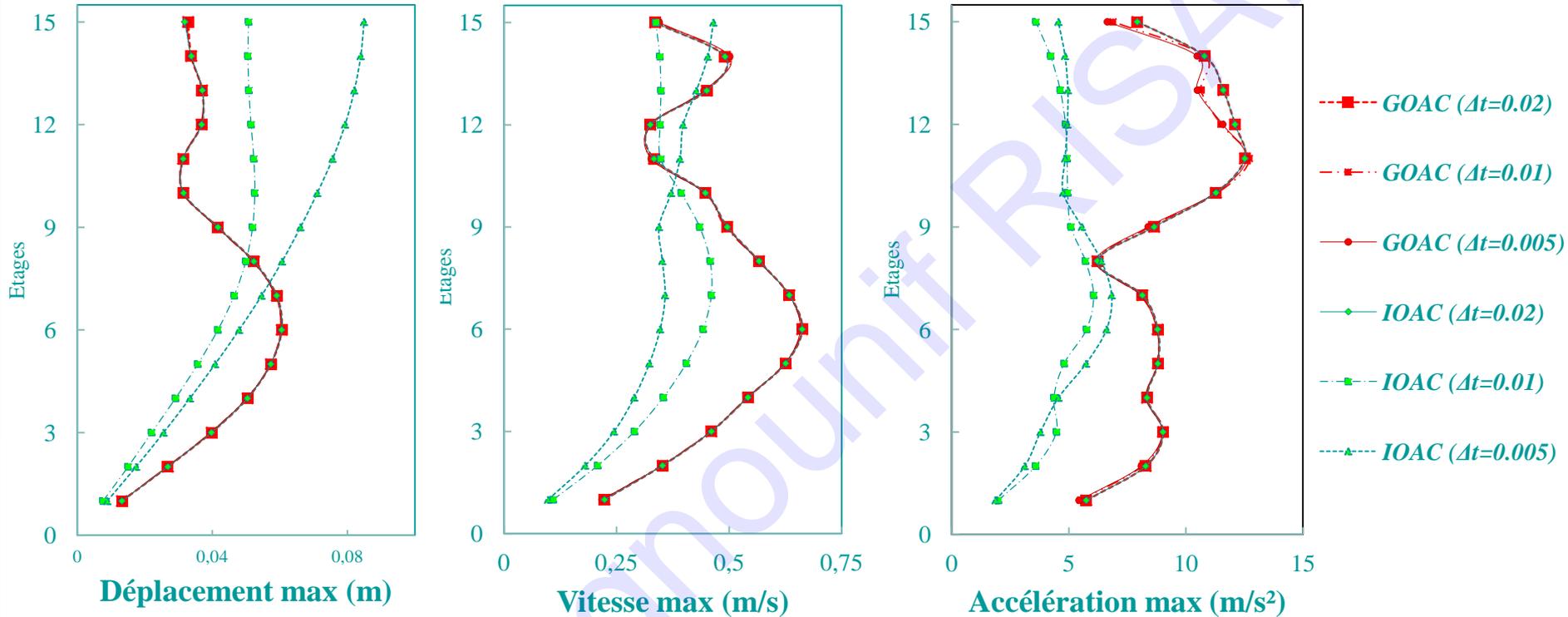
Effet de l'incrément du temps



$\Delta t = 0.02 \text{ s}$



Effet de l'incrément du temps



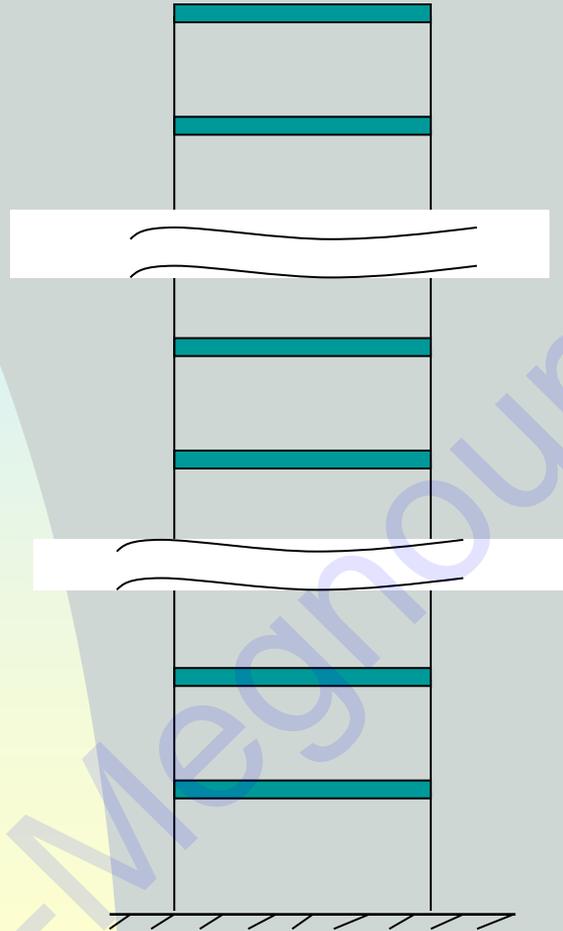
*GOAC est plus efficace
que IOAC*

IOAC et GOAC sont plus efficaces que ROAC

GOAC est plus efficace que IOAC

GOAC est le plus efficace

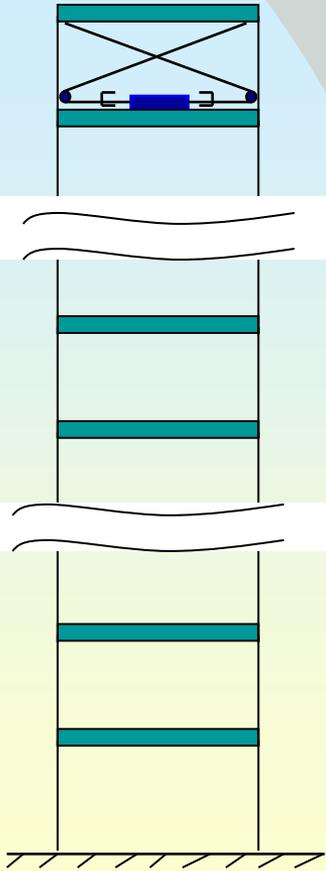
Effet de la position des contrôleurs



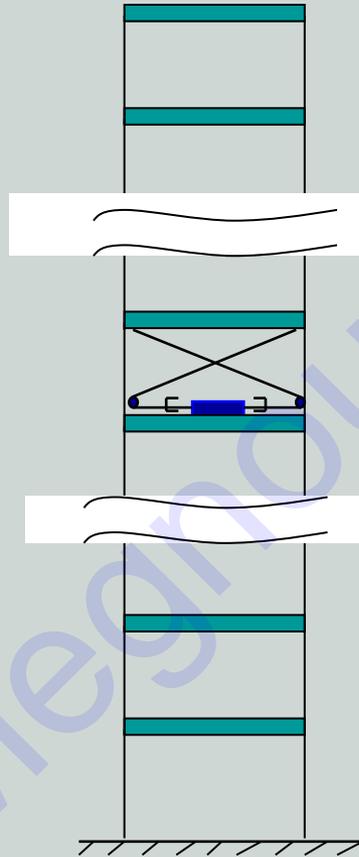
Pr-Meghounif RISAM



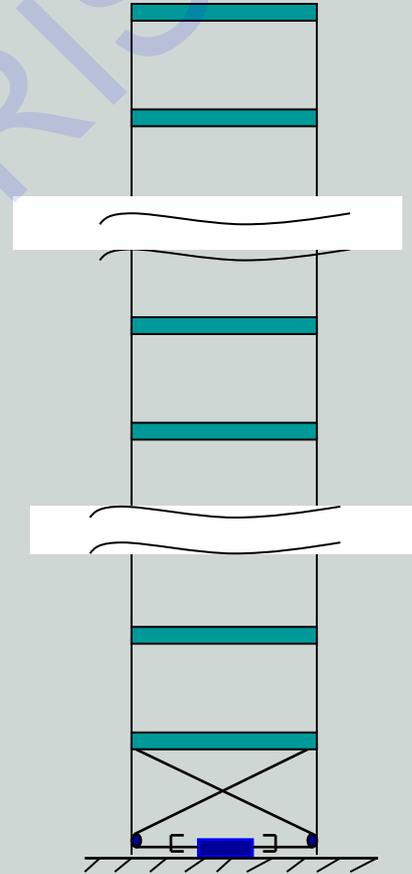
Effet de la position des contrôleurs



A)

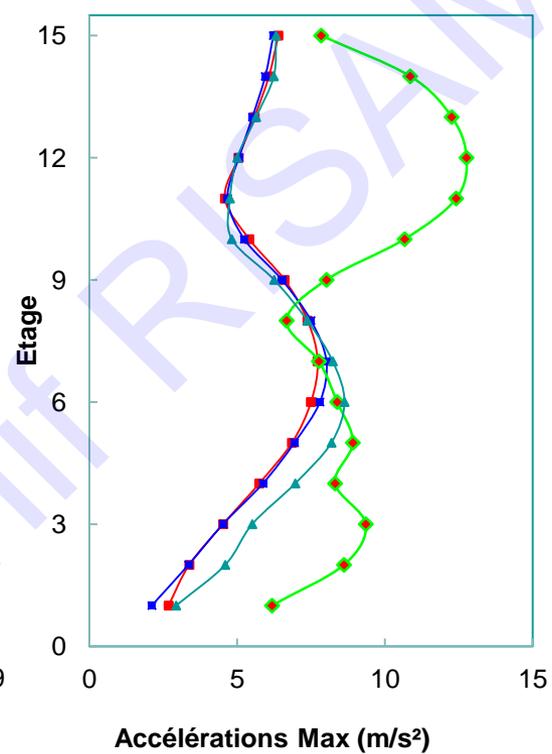
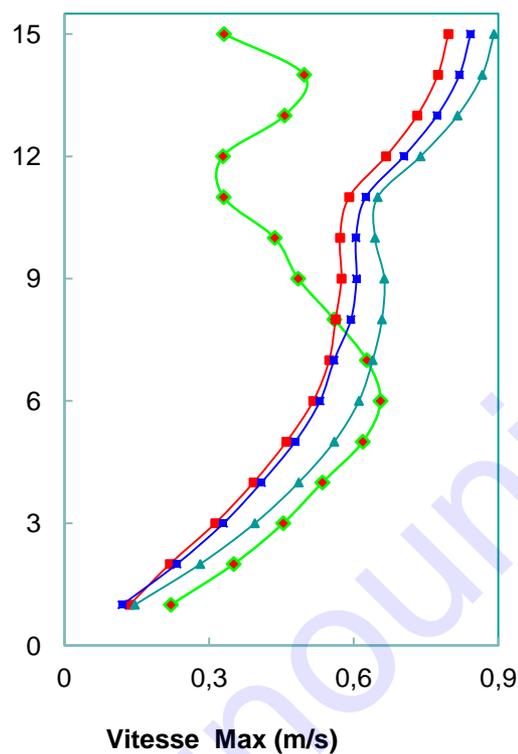
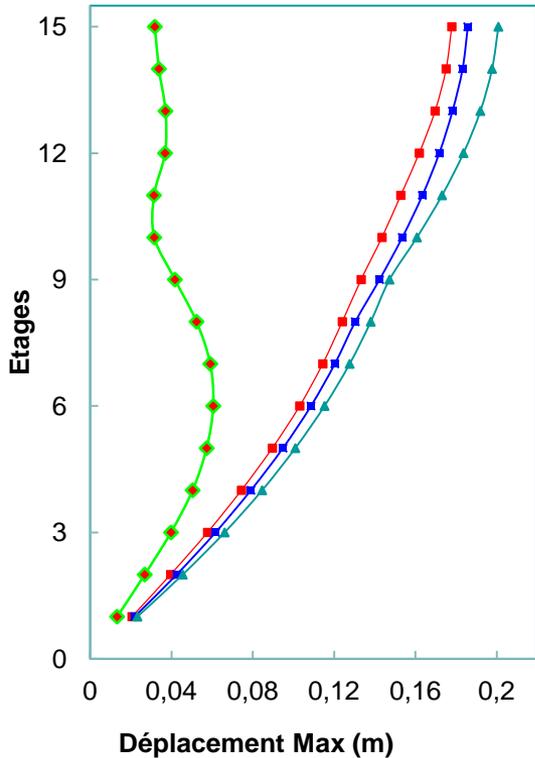


B)

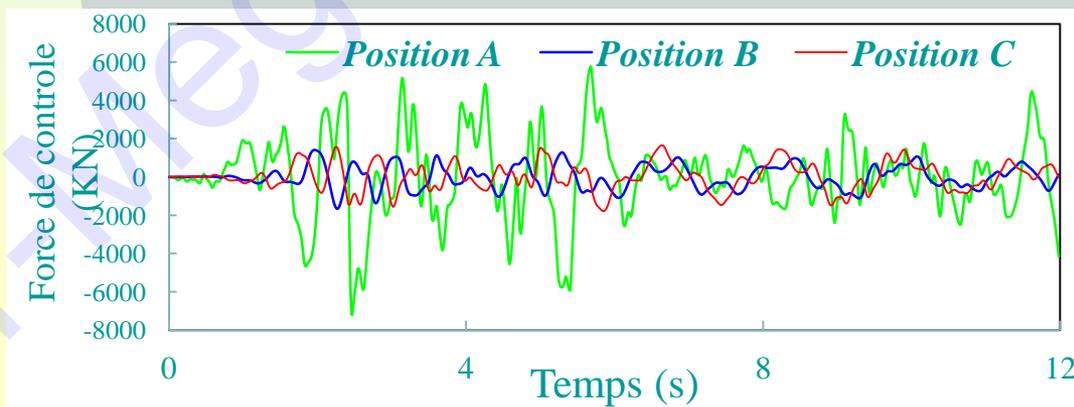


C)

Effet de la position des contrôleurs



- Position C
- Position B
- Position A
- Sans Contrôle



MATERIAUX INTELLIGENTS

Pr-Meghouni PRISAM



Evolution des matériaux dans le temps

Matériaux naturels :
bois, pierre, cuir, os, lin
etc...



Matières plastiques,
composites



Matériaux Intelligents
adaptatifs



**matériaux
intelligents**

**Alliage à
mémoire
de forme**

**Électrode
strictif**

**Fibres
optiques**

**Magnéto-
strictif**

**Piézoélec-
trique**

**Céramiques
piézoélectrique
de synthèse**

Quartz

**PZT –
Titanozirconate
de plomb**

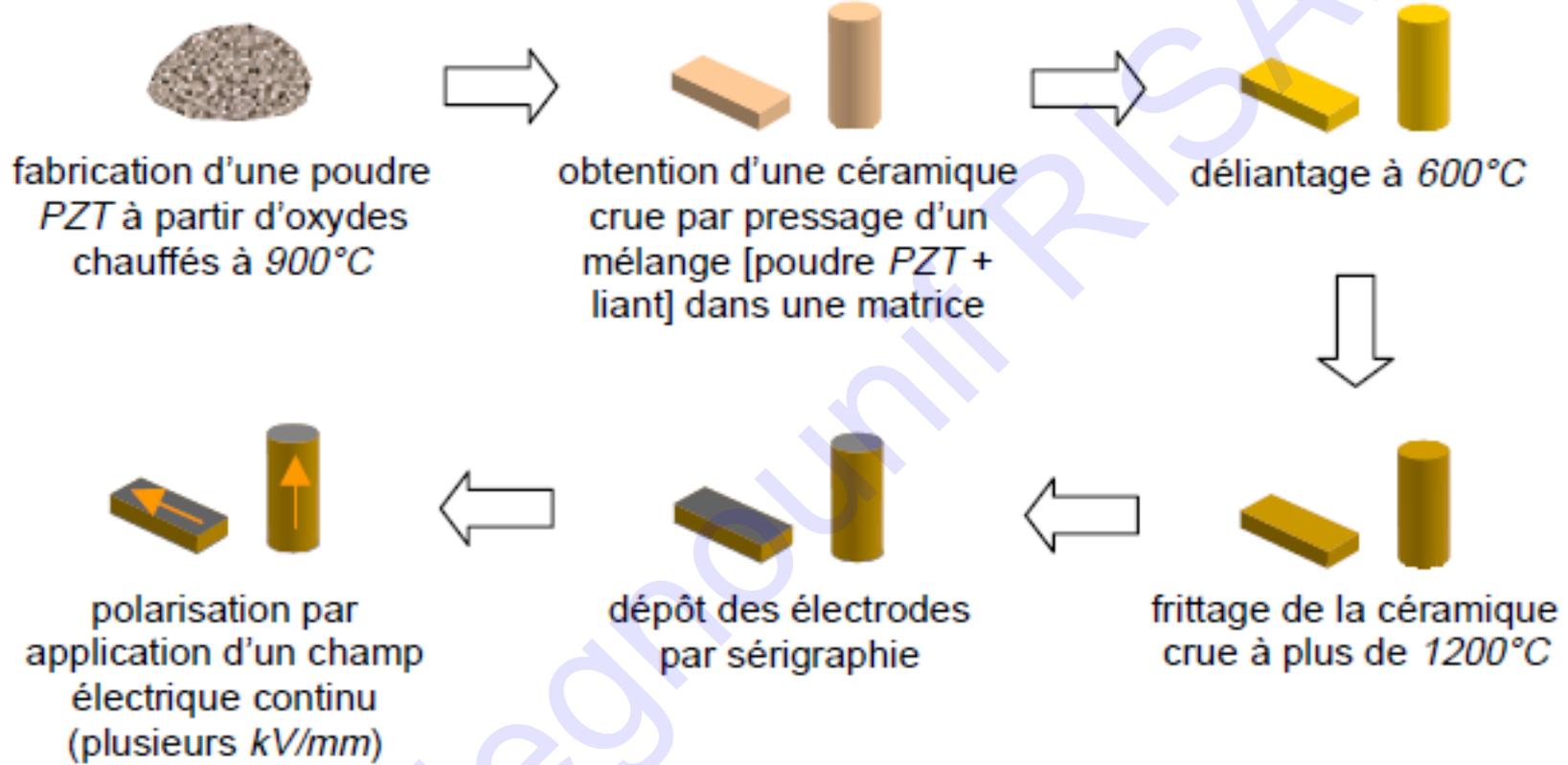
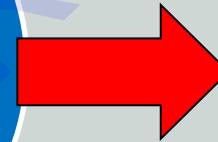
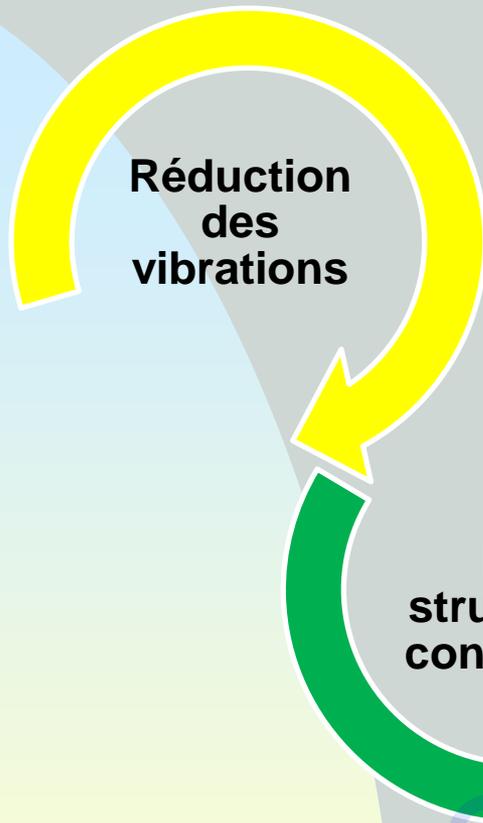
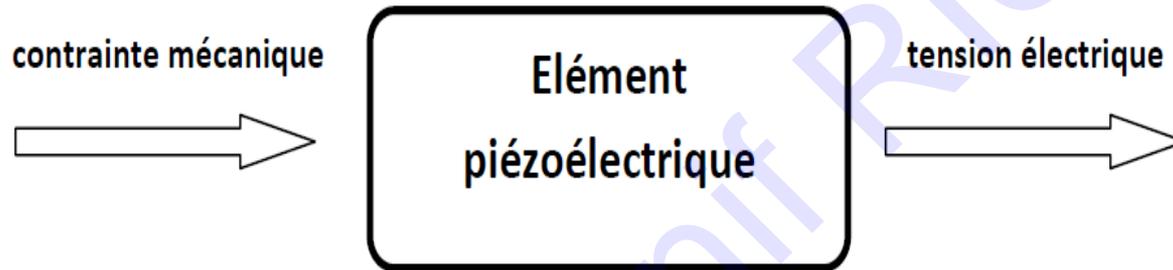


Figure III.1 Cycle de fabrication des céramiques *PZT* par voie solide.

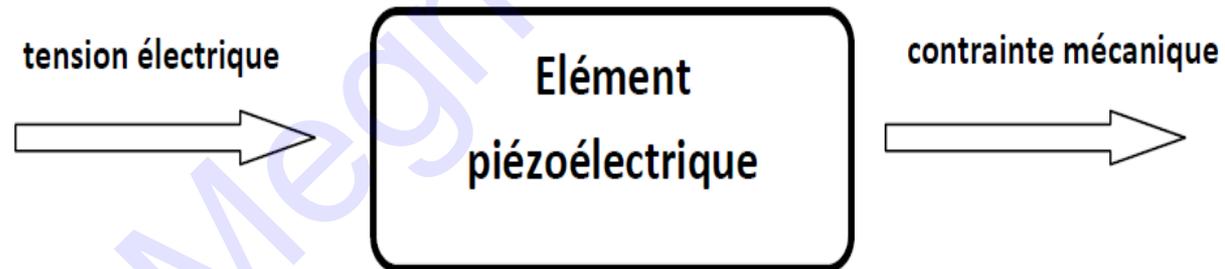


La Piézoélectricité

Effet piézoélectrique direct



Effet piézoélectrique inverse



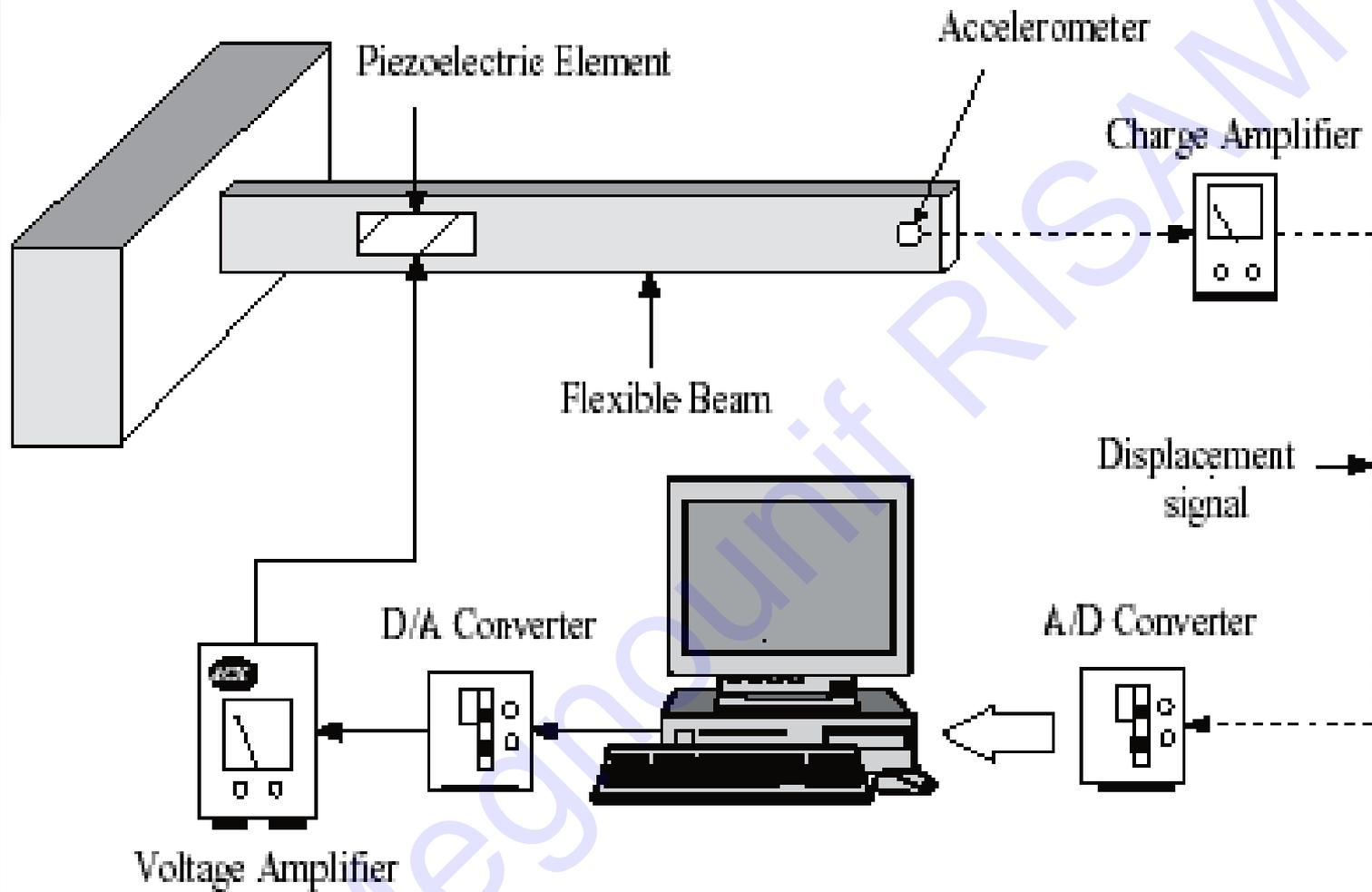
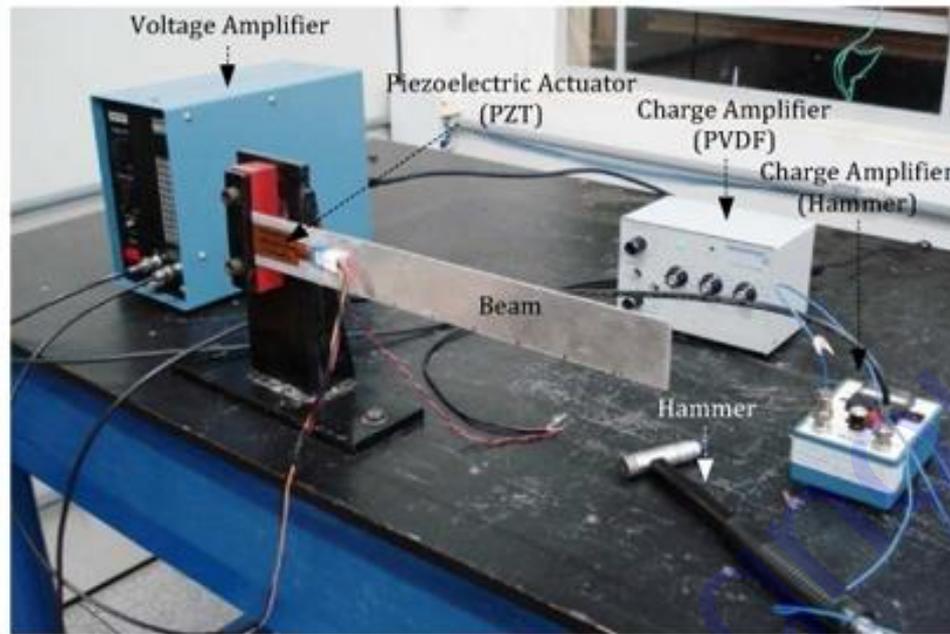


Figure 3: Schematic diagram of the vibration control experiment.



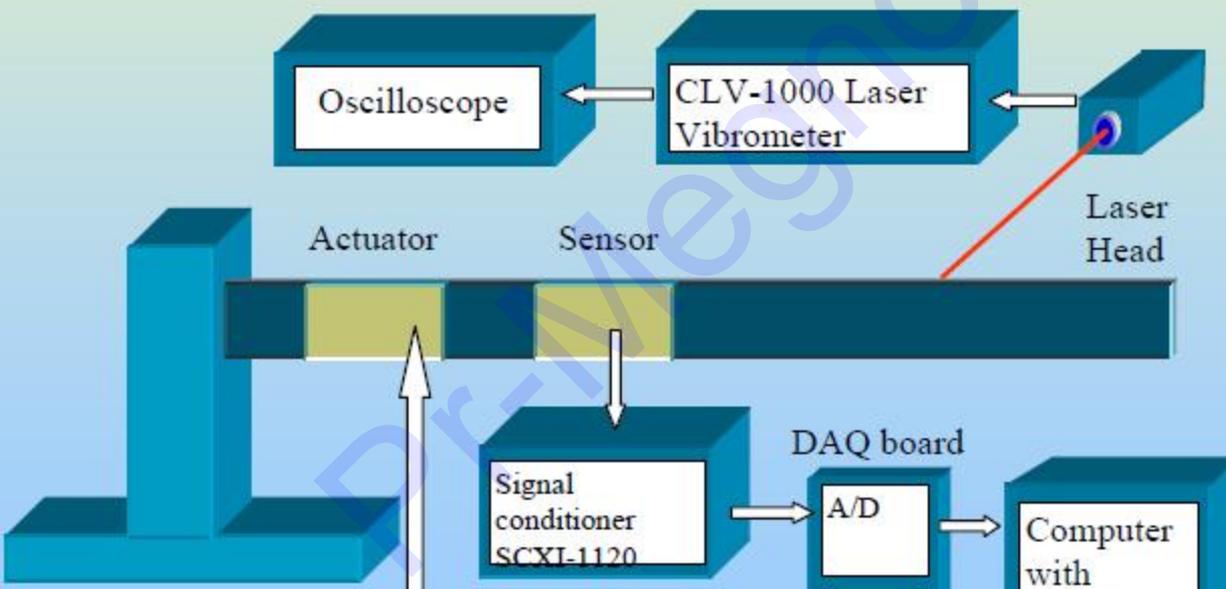
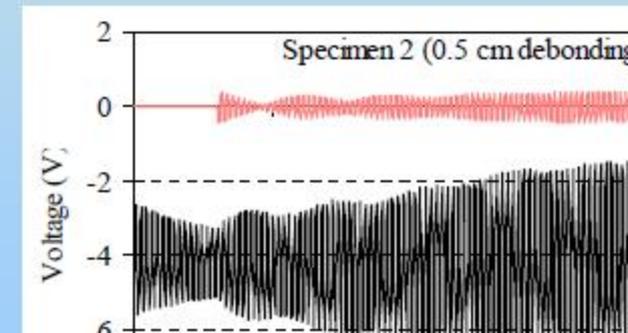
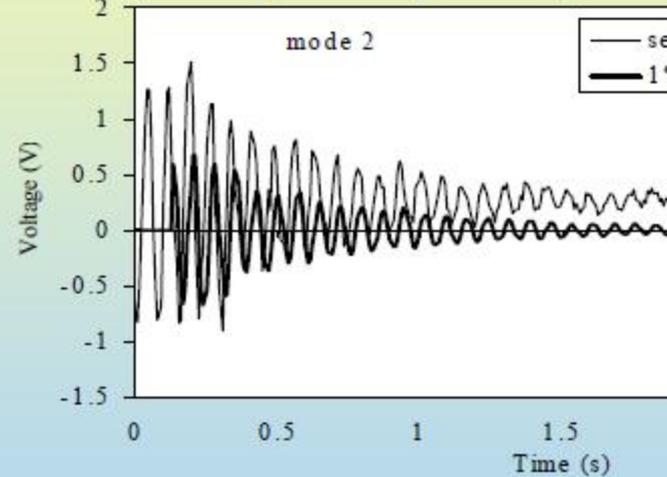
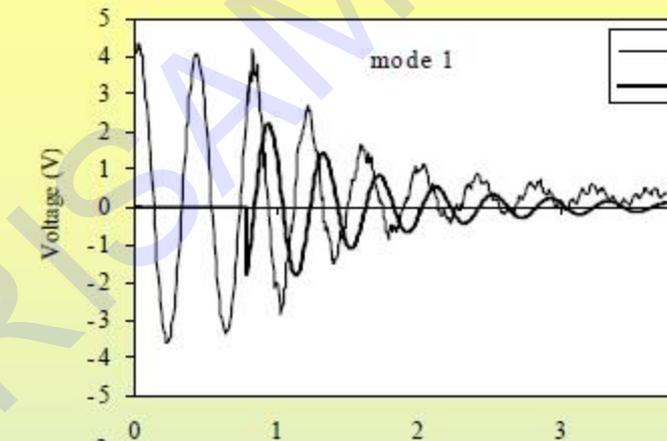
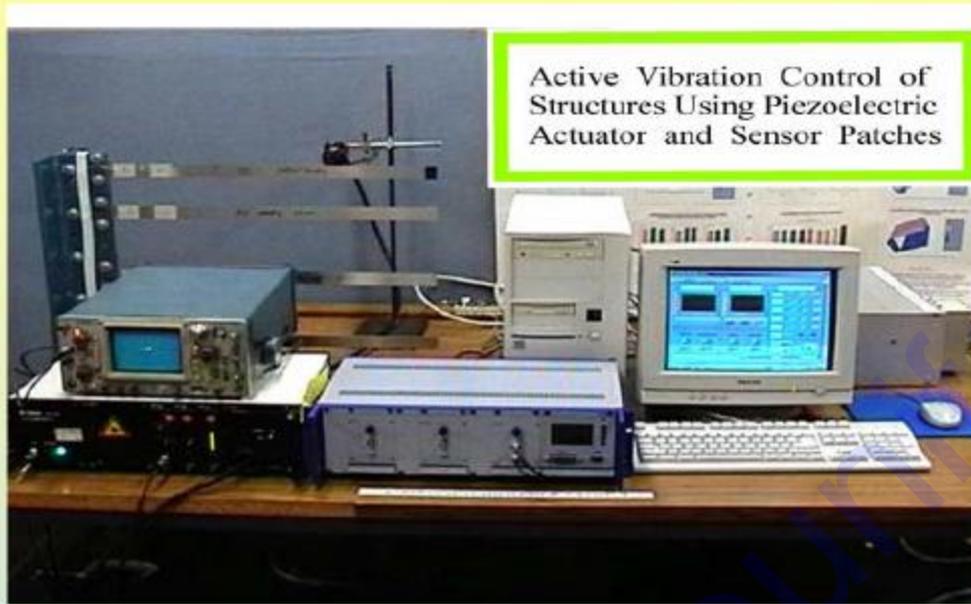
(a)



(b)

Figure 2. Photographs of the experimental setup: (a) the overall setup; (b) location of the piezoelectric sensor.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION



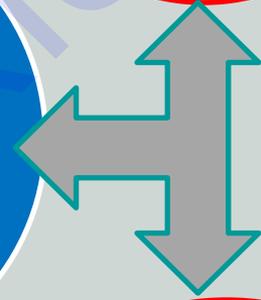
**Réduction
des
vibrations**

**Les
structures
contrôlées**

**Les
matériaux
intelligents**

**Patch
piézoéle
ctrique**

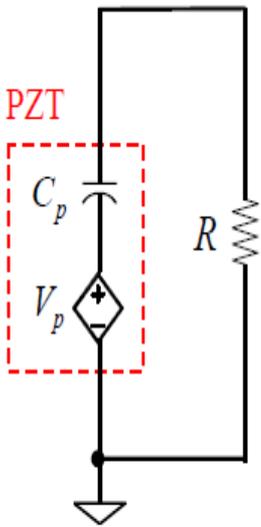
SHUNT



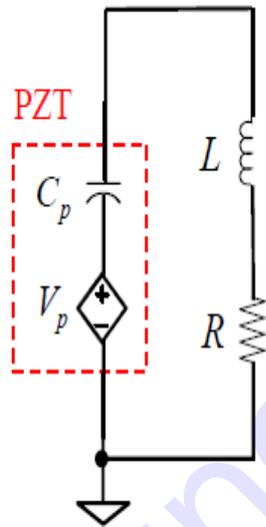
Pr-Me...



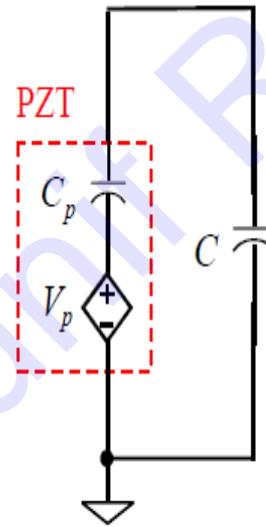
Le SHUNT



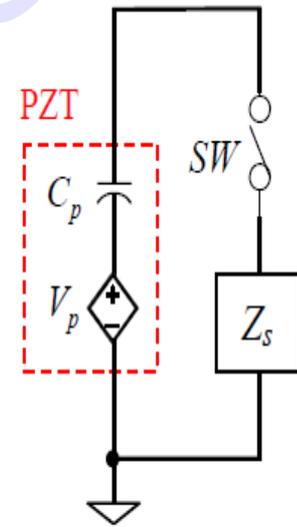
(a) Resistive



(b) Inductive

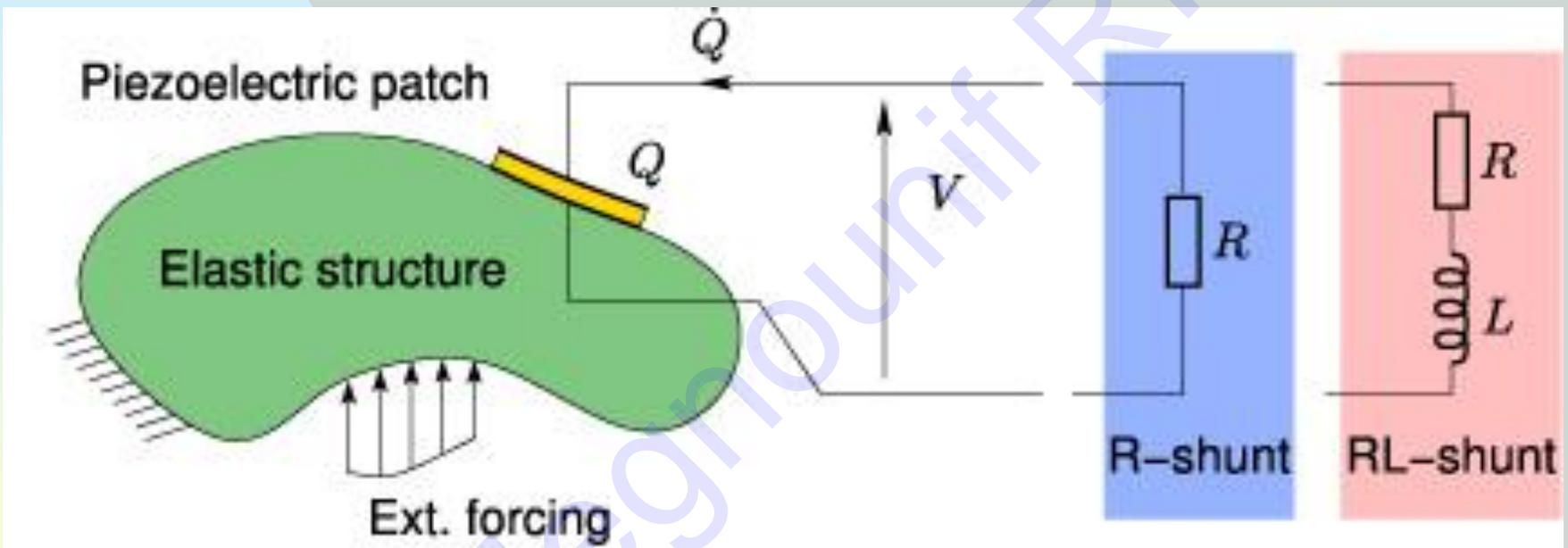


(c) Capacitive

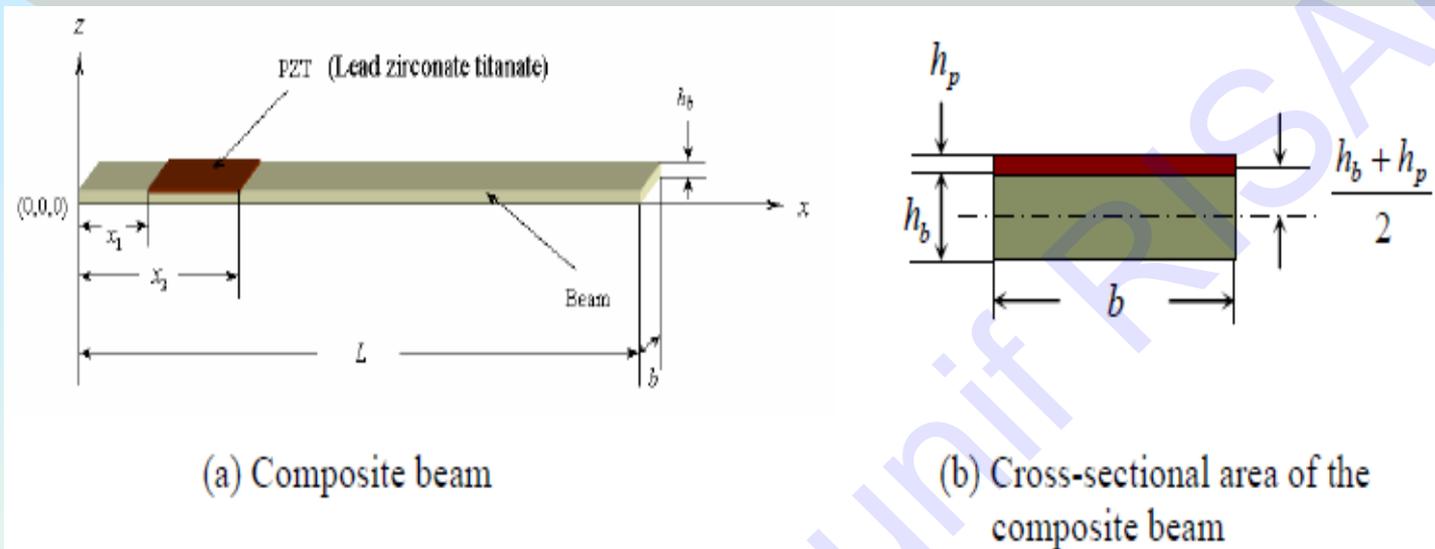


(d) Switching

Combiner la piézoélectricité avec la Shunt

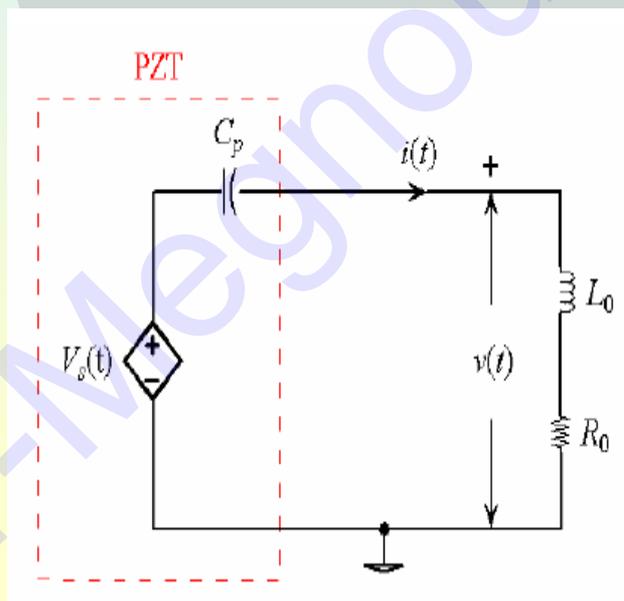


Mise en Equations



(a) Composite beam

(b) Cross-sectional area of the composite beam



D'après le principe de HAMILTON

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U + W) dt = \int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta U + \delta W_p + \delta W_f) dt = 0$$

L'équation du mouvement d'un poutre composite attaché un élément PZT

$$E_b I_b \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + E_p I_p \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} [H(x - x_1) - H(x - x_2)] + 2E_p I_p \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} [\delta(x - x_1) - \delta(x - x_2)] + E_p I_p \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} [\delta'(x - x_1) - \delta'(x - x_2)] + \varphi_b A_b \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \varphi_p A_p \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} [H(x - x_1) - H(x - x_2)] - h_{31} A_p \left(h_b + \frac{h_p}{2} \right) \mathbf{D}_3 [\delta'(x - x_1) - \delta'(x - x_2)] = f(x, t)$$

Or

$$D_3 = \frac{1}{\beta_{33}} (E_3 + h_{31} \varepsilon_{11}) = \frac{1}{\beta_{33}} \left(\frac{v(t)}{h_p} + h_{31} \varepsilon_{11} \right)$$



les principaux modes de déplacement transversal peuvent être exprimés

$$w(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) q_r$$

méthode de Galerkin

L'équation du mouvement d'un poutre composite sous forme ODE

$$\begin{aligned} & \sum_{r=1}^N \left(\int_0^L [\varphi_b A_b + \varphi_p A_p [H(x - x_1) - H(x - x_2)]] \phi_r(x) \phi_s(x) dx \right) \ddot{q}_r(t) \\ & + \sum_{r=1}^N \left(\int_0^L [E_b I_b + E_p I_p [H(x - x_1) - H(x - x_2)]] \phi_r''(x) \phi_s''(x) dx \right) q_r(t) \\ & - h_{31} A_p \left(h_b + \frac{h_p}{2} \right) \mathbf{D}_3 \int_{x_1}^{x_2} \phi_s''(x) dx = \int_0^L f(x, t) \phi_s(x) dx \end{aligned}$$



Shunt R-L en Série

contrôle des vibrations avec le circuit de shunt piézoélectrique

Series R-L shunt

Le courant électrique :

$$i(t) = -\frac{dQ}{dt} = -S_p \frac{dD_3}{dt} = \frac{-S_p}{\beta_{33}} \left(\frac{1}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} - h_{31} z \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial t} \right)$$

Or

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{\beta_{33} h_p}{S_p} i(t) + h_{31} h_p z \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial t}$$

la tension aux bornes des électrodes de PZT (loi de tension de Kirchhoff) est:

$$v(t) = L_0 \frac{di(t)}{dt} + R_0 i(t)$$

$$L_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R_0 \frac{di(t)}{dt} + \frac{\beta_{33} h_p}{S_p} i(t) = h_{31} h_p z \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial t} \rightarrow V_s(t)$$

$$L_0 \ddot{i}(t) + R_0 \dot{i}(t) + \frac{1}{C_p} \int i(t) dt = V_s(t)$$

La forme matricielle de l'équation :

$$M\ddot{q} + Kq + B\dot{q} = f_d$$

Avec amortissement :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq + B\dot{q} = f_d$$

le contrôle des vibrations avec des branches multiples en séries peut être représentée comme une forme de matrice :

$$i + \Gamma i + \Omega \dot{i} + \Psi q = 0$$

$$\Gamma = \frac{R_1}{L_1} \dots \dots \dots \frac{R_N}{L_N}$$

$$\Omega = \frac{1}{C_p L_1} \dots \dots \dots \frac{1}{C_p L_N}$$

$$\Psi = \Psi_1 \dots \dots \dots \Psi_N$$



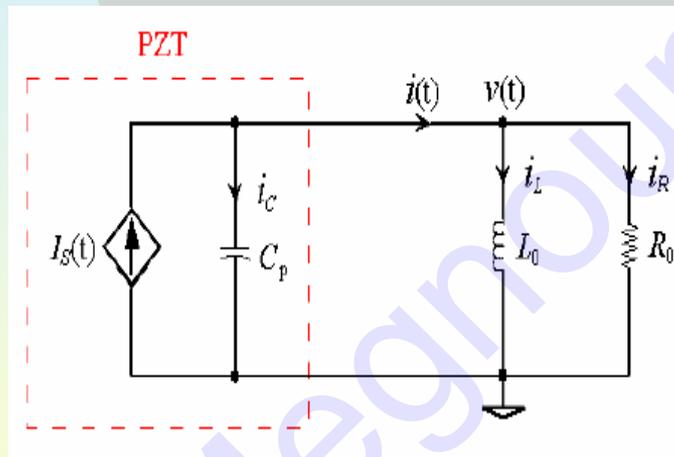
Shunt R-L en Parallèle

Le courant électrique :

$$i(t) = -S_p \frac{dD_3}{dt} = \left(-C_p \frac{dv(t)}{dt} - h_{31} h_p C_p \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial t} \right) = i_L + i_R$$

Selon la loi actuelle du Kirchhoff

$$i_C + i_L + i_R = I_s$$



la tension aux bornes des électrodes de PZT est

$$v(t) = \frac{1}{C_p} \int i_C dt = -h_{31} h_p \varepsilon_{11} - \frac{L_0}{R_0 C_p} i_L - \frac{1}{C_p} \int i_L dt$$

$$\sum_{r=1}^N \left(\int_0^L [\varphi_b A_b + \varphi_p A_p [H(x - x_1) - H(x - x_2)]] \phi_r(x) \phi_s(x) dx \right) \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \left(\int_0^L [E_b I_b + E_p I_p [H(x - x_1) - H(x - x_2)]] \phi_r''(x) \phi_s''(x) dx \right) q_r(t) + B_L i_L + B_R \int i_L dt = \int_0^L f(x, t) \phi_s(x) dx$$

La forme matricielle de l'équation :

$$M\ddot{q} + Kq + B_L i_L + B_R \tilde{i}_L = f_d$$

le contrôle des vibrations avec des branches multiples en parallèle peut être représentée comme une forme de matrice :

$$\dot{i}_L + \Gamma i_L + \Omega \tilde{i}_L + \Psi q = 0$$

$$\Gamma = \frac{1}{C_p R_1} \dots \dots \dots \frac{1}{C_p R_N}$$

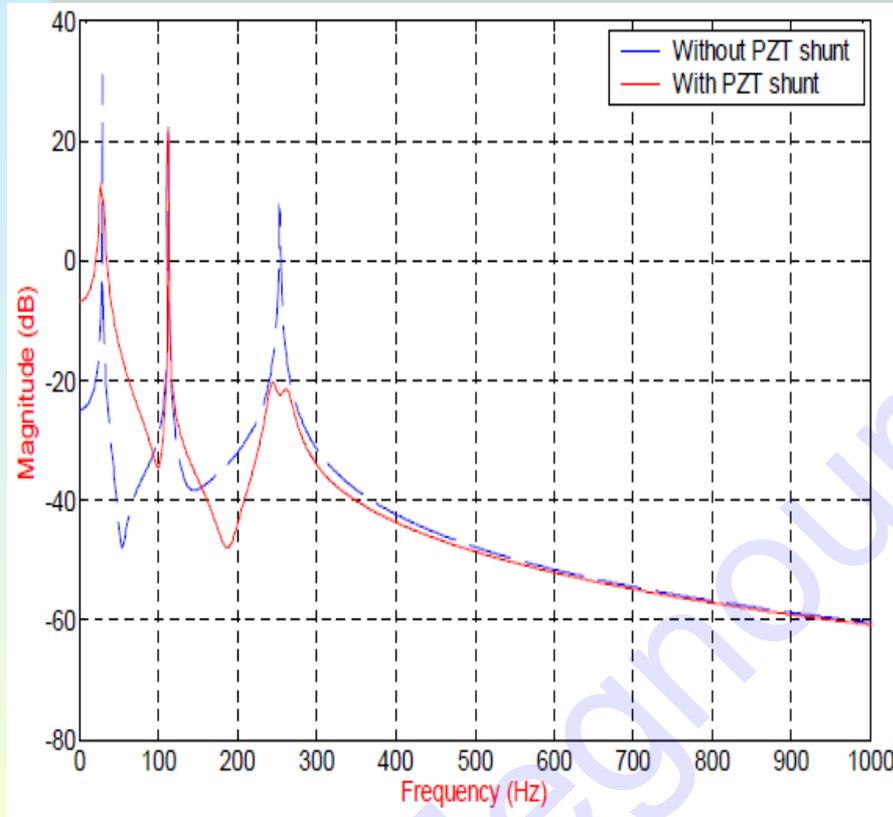
$$\Omega = \frac{1}{C_p L_1} \dots \dots \dots \frac{1}{C_p L_N}$$

$$\Psi = \Psi_1 \dots \dots \dots \Psi_N$$



Exemple d'une poutre aluminium attachée à un PZT placé à $L/2$

* **Shunt branché en parallèle**

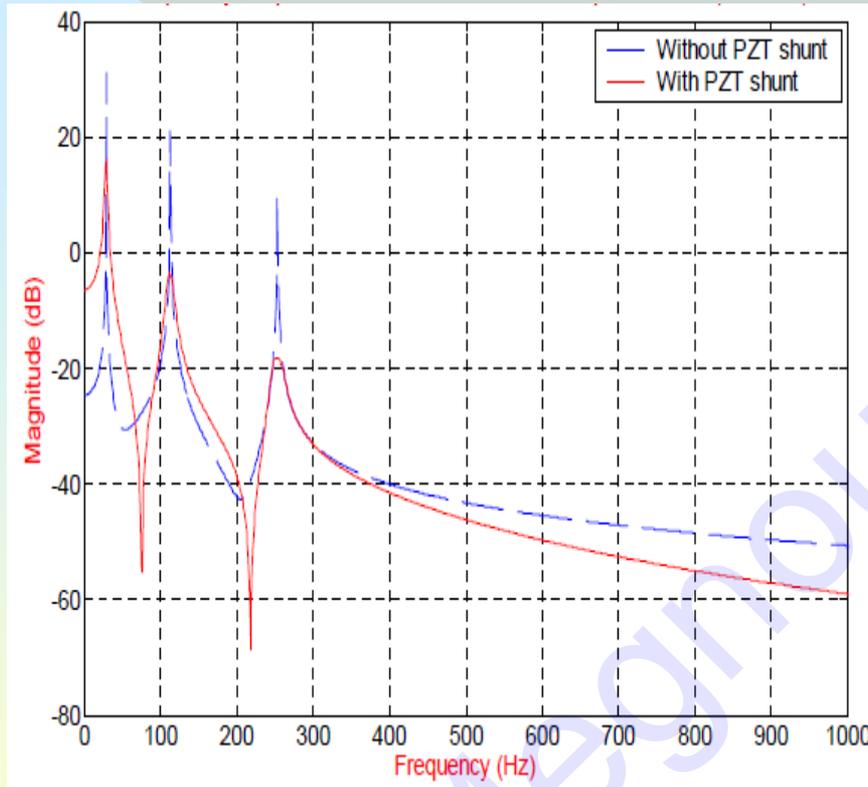


Mode1= 21 db

Mode3= 31db

Réponse en fréquence du déplacement transversal de la poutre avec le patch de PZT fixé au milieu de la poutre

Exemple d'une poutre aluminium attachée à un PZT placé à L/4

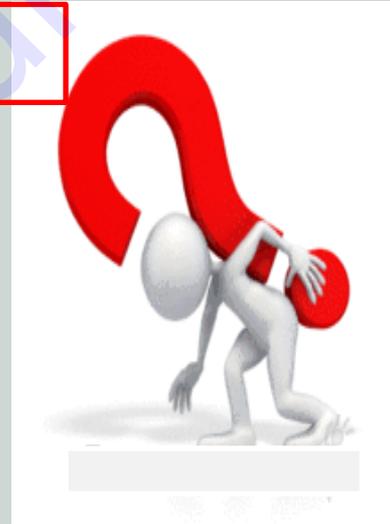


Mode1= 15 db
Mode2= 24db
Mode3 = 28 db

Réponse en fréquence du déplacement transversal de la poutre avec le patch de PZT fixé L/4



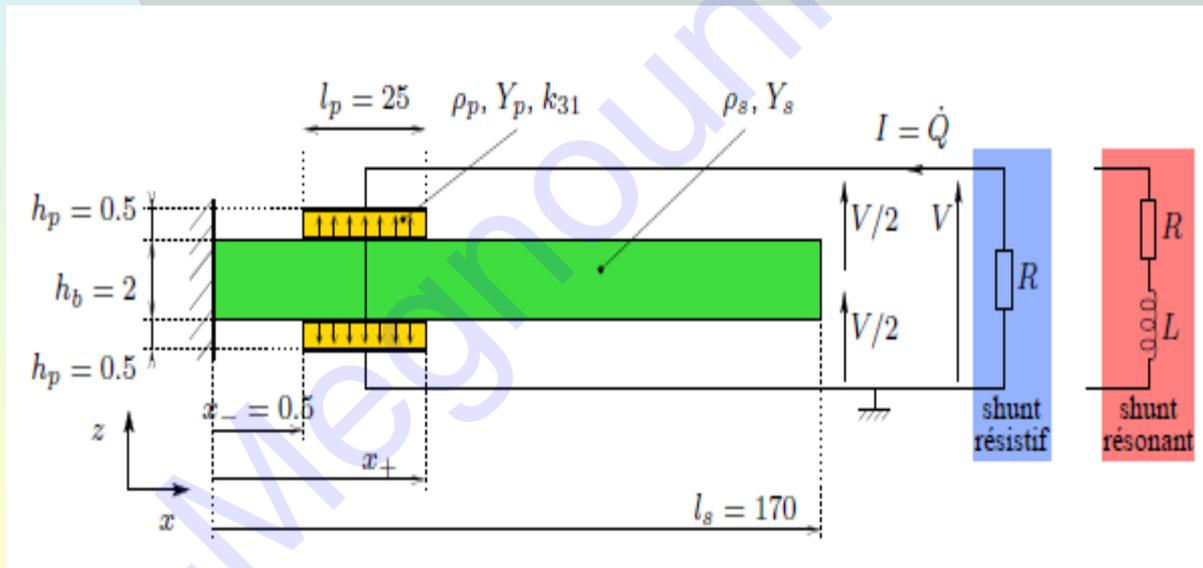
Quel est
l'influence du
SHUNT ?



Pr-Meghounif RISAM

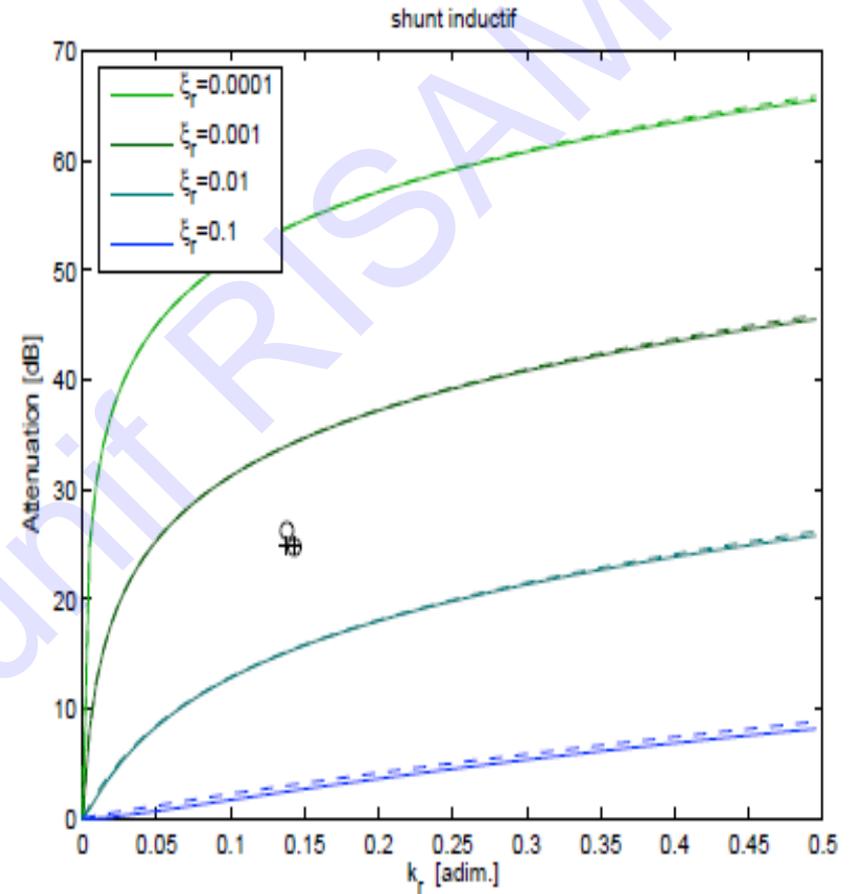
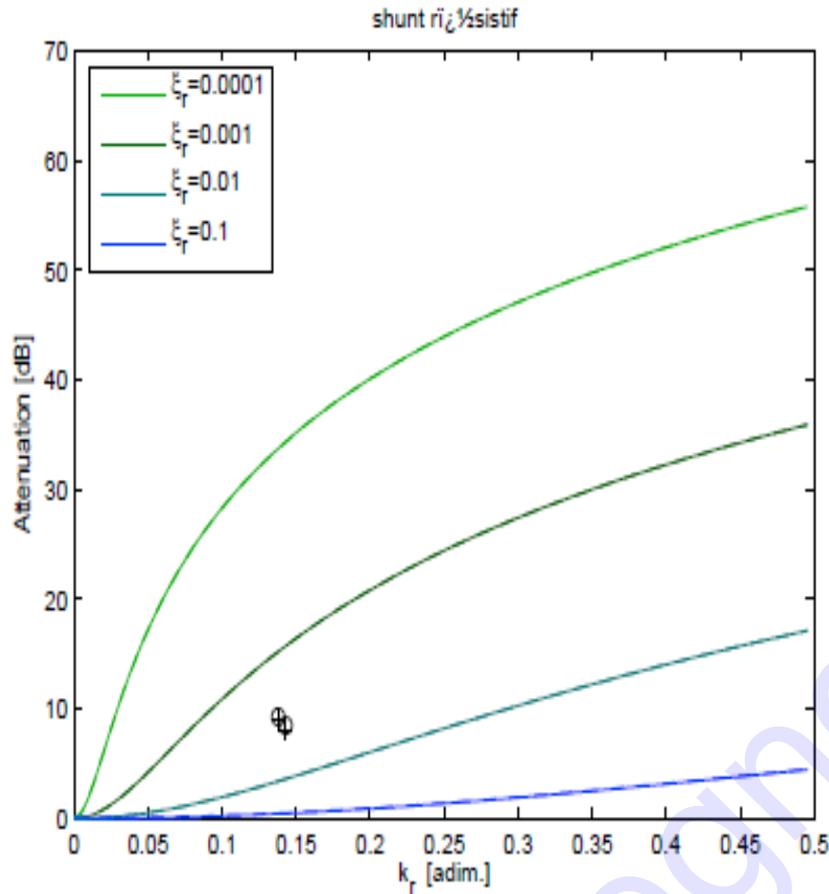
Optimisation de dispositifs passifs d'atténuation de vibration par shunt piézoélectrique

- Représentation du problème électromécanique couplé et évaluer les performances de deux types de Shunts
- une optimisation de la taille des éléments piézoélectriques et de leur position sur la structure



Poutre étudiée, munie des pastilles piézoélectriques et associée aux shunt R ou RL. (Les dimensions sont en mm.)

ζ_r : amortissement; K_r : couplage; A_{db} : atténuation



Atténuation du pic de réponse obtenue avec des shunts optimaux en fonction de K_r et ζ_r

— résultats numériques, -- résultats analytiques, \circ atténuations calculées d'après k_r et ξ_r mesurés, + atténuations mesurées.



		Mode 1		Mode 2	
		Théo.	Exp.	Théo.	Exp.
Amortissement	ξ_r [%]	—	0.31	—	0.28
Couplage	k_r [adim.]	0.147	0.142	0.143	0.136
A_{dB} shunt R	A_{dB}^R [dB]	8.5	8	9.3	8.3
A_{dB} shunt RL	A_{dB}^{RL} [dB]	24.8	24.9	26.3	24.8

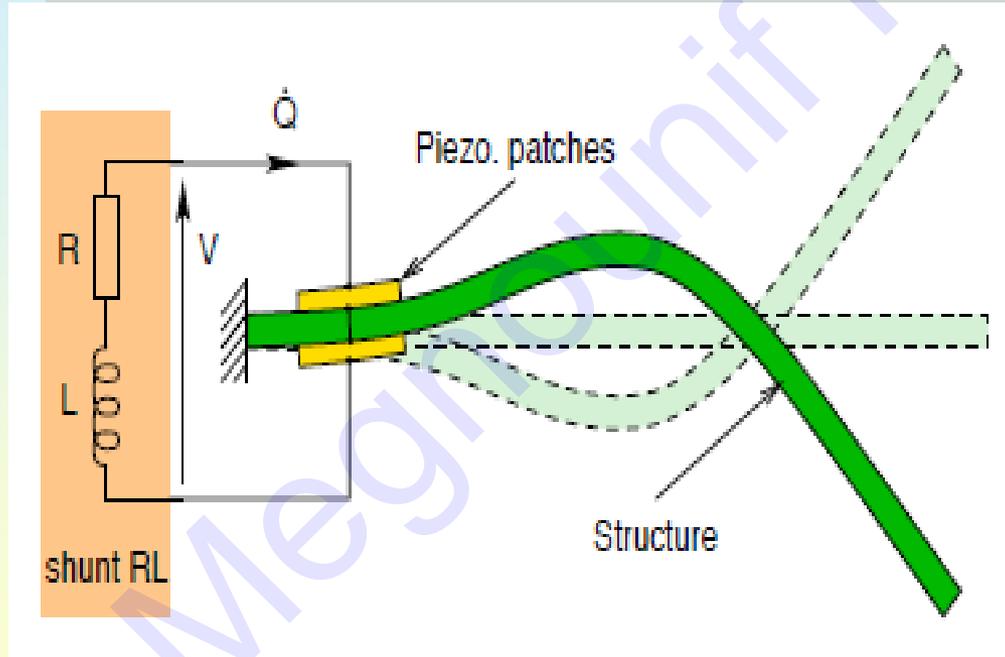
Facteurs d'amortissement, coefficient de couplage, atténuation obtenue et estimée d'après les paramètres mesurés

➤ En général

- le shunt résistif est bien moins efficace que le shunt inductif
- le shunt résistif efficace sur d'autres modes que le mode d'accord, ce qui n'est pas le cas du shunt inductif
- le shunt résistif conserve ses performances en cas de déviation d'un paramètre tandis que le shunt inductif requiert un accord très précis.

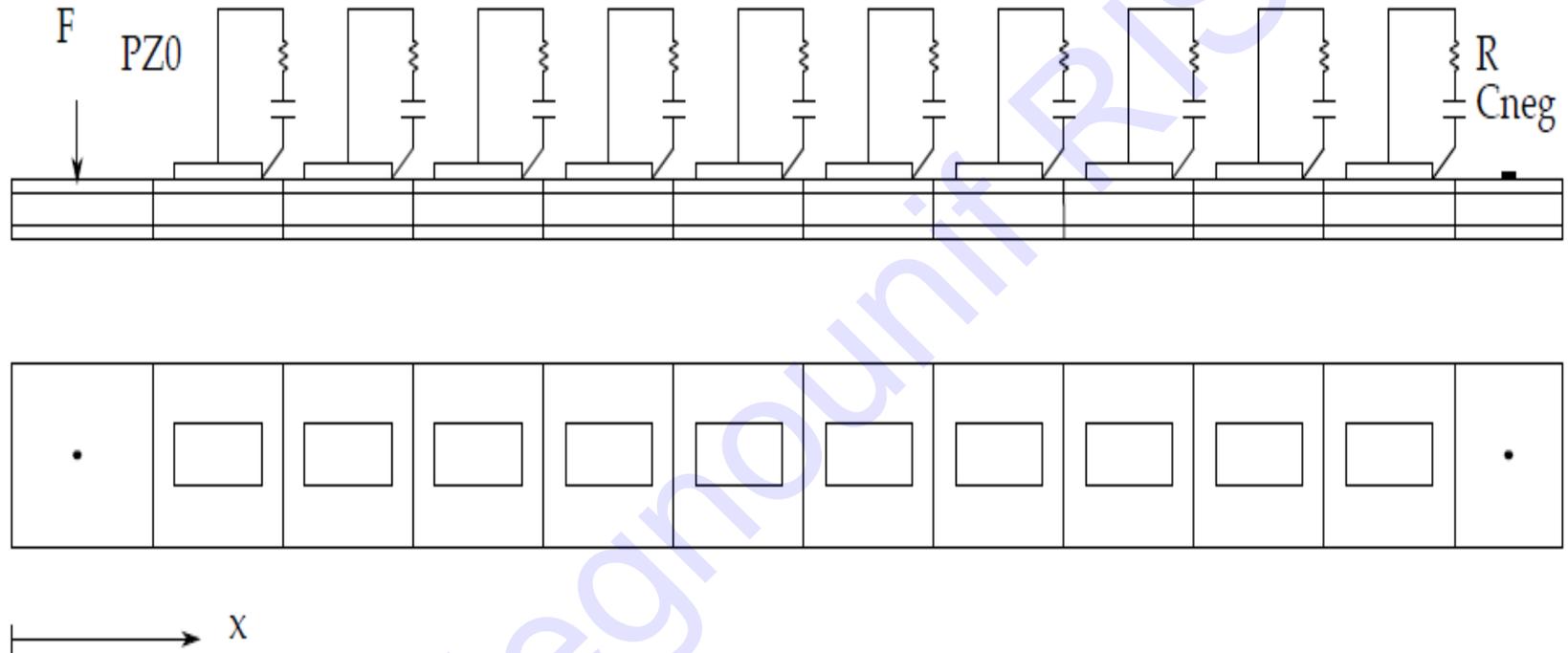
Atténuation de vibration par shunt piézoélectrique en présence d'incertitude sur les paramètres électriques

Evaluer la sensibilité de la réponse vibratoire du système en fonction des variations des paramètres électriques du shunt autour de leur valeur optimale.



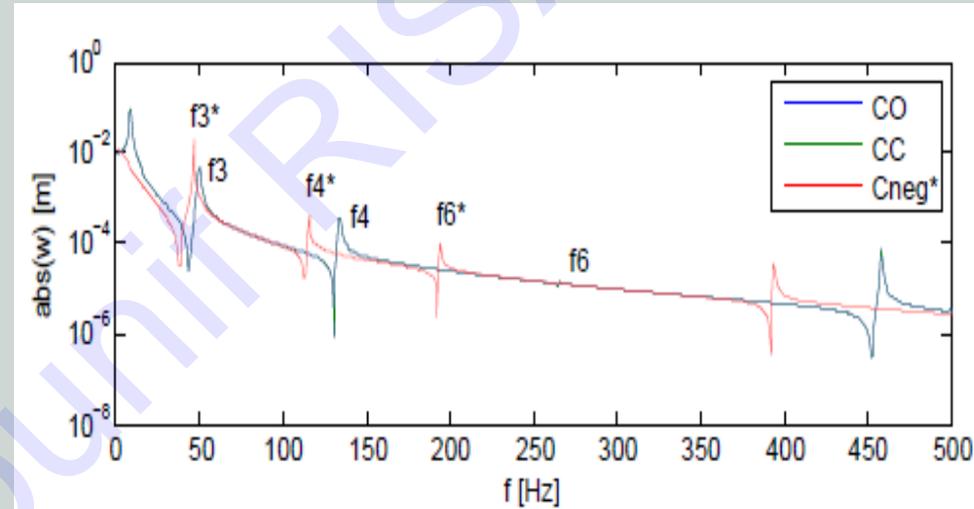
Systeme muni de pastilles piézoélectriques et associé au shunt RL

Patches piézoélectriques shuntés distribués sur une poutre en composite



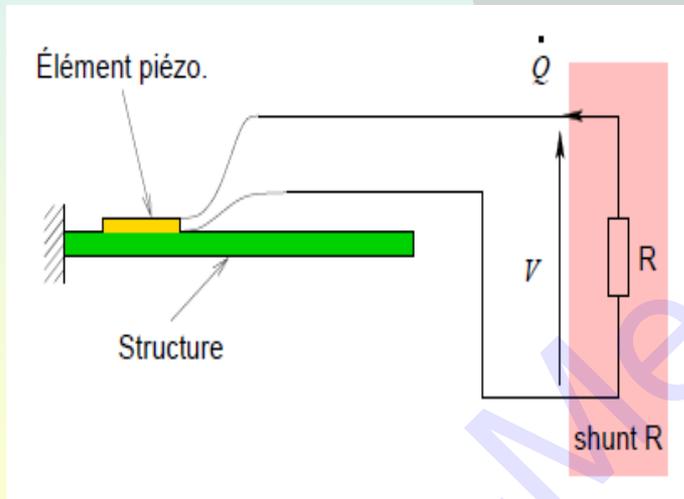
Pbs de C.L électriques (CC, CO)

- ✓ l'introduction du circuit capacitif est capable d'influencer le comportement de la structure
- ✓ la modification des conditions aux limites électriques, à savoir court-circuit CC ou circuit ouvert CO, n'ont presque aucune influence sur le comportement dynamique de la structure

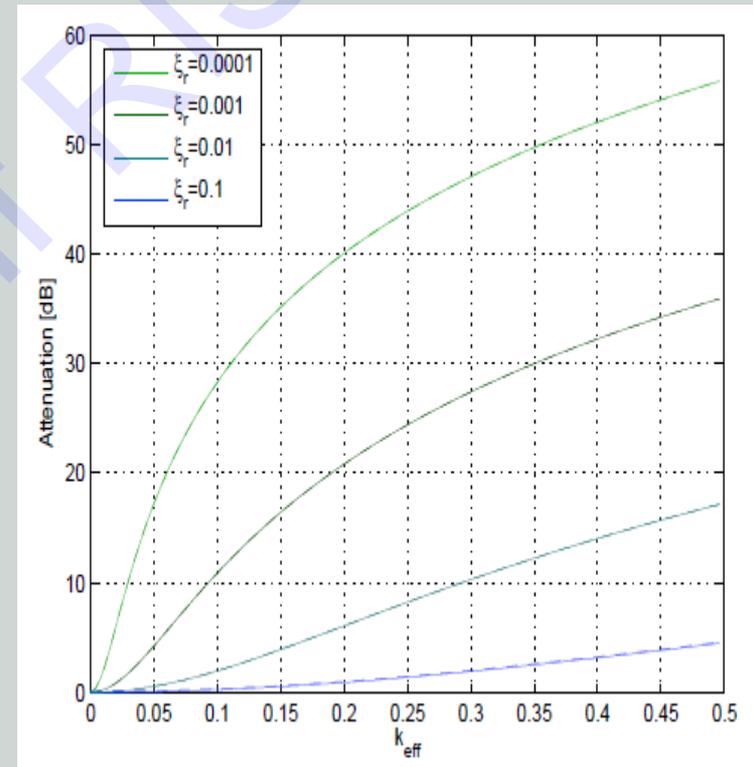


Modélisation et optimisation de dispositifs non-linéaires d'amortissement de structures par systèmes piézoélectriques commutés shunt résistif

Structure, éléments piézoélectrique et shunt résistif.



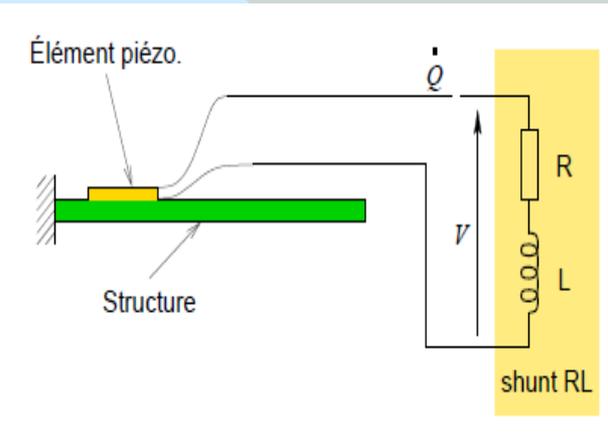
Atténuation du pic de réponse obtenue avec une résistance optimale en fonction du couplage : résultats numériques en traits pleins et résultats numériques en pointillés



✓ 10 dB d'atténuation pour un cas où $kr = 0, 1$ et $\xi_r = 0,001\%$

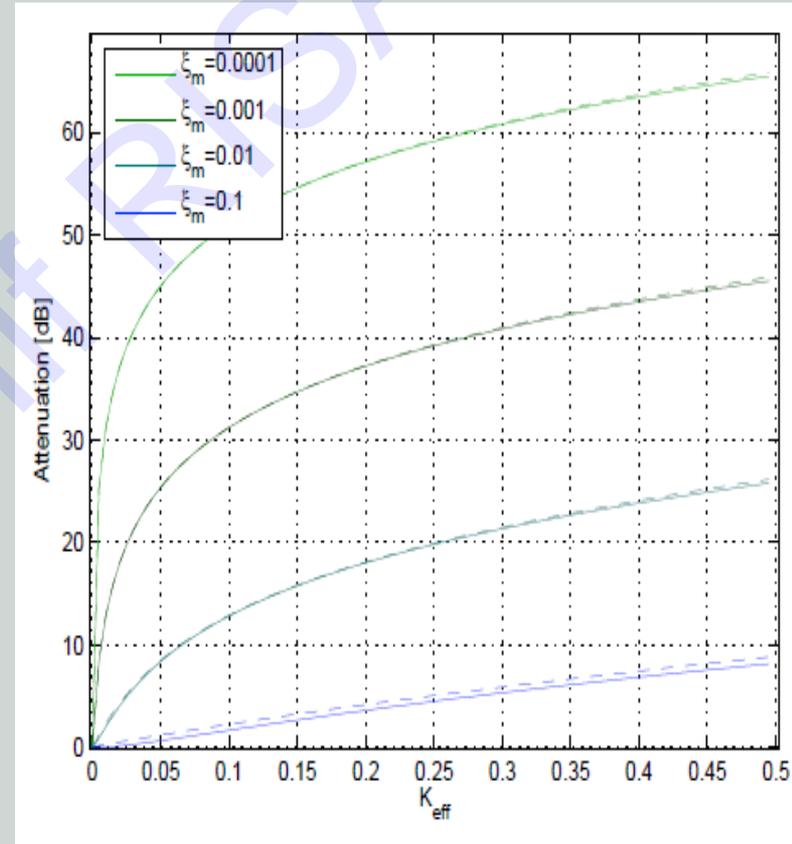


shunt résonant



**Structure,
éléments
piézoélectrique
et shunt résistif.**

Atténuation du pic de réponse obtenue avec une résistance optimale en fonction du couplage : résultats numériques en traits pleins et résultats numériques en pointillés



✓ **30 dB d'atténuation** pour un cas où $k_r = 0, 1$ et $\xi_r = 0, 001\%$

En général

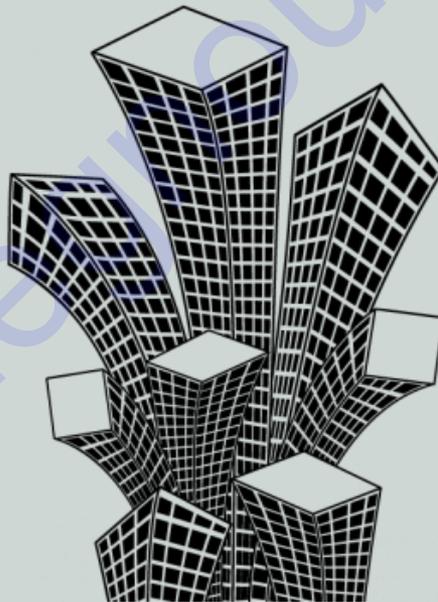
- Dans le cas de Shunt résistif il est très facile d'associer une résistance à un élément piézoélectrique
- la performance n'est pas trop dégradée si un des paramètres varie
- il est nécessaire d'avoir un couplage élevé pour obtenir un amortissement important
- shunt résonant est bien plus efficace mais dépend de l'accord précis de l'inductance avec la résonance du système.



L'efficacité du contrôle est sensible à l'emplacement de l'élément piézoélectrique et la précision du shunt accordé

Pr-Meghraj PISAM

STRUCTURES ADJACENTES CONNECTEES ET LEUR CONTROLE VIBRATOIRE

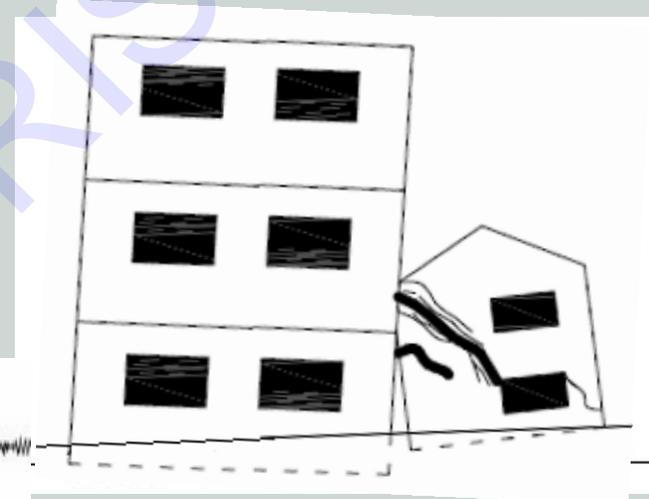
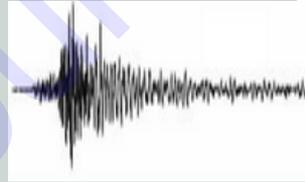


L'augmentation de la population et la croissance des activités sociales et commerciales disponibles, ont conduits les décideurs à construire de plus en plus en hauteur, et surtout à construire des bâtiments très proches l'un de l'autre.

C'est ce qu'on appelle **les bâtiments adjacents.**

Ces bâtiments, dans la plupart des cas, sont séparés sans connexions structurelles ou sont connectés uniquement au niveau du sol.

Ces structures sont généralement séparées par un vide (joint) entre elles. Si ce joint n'est pas suffisant, une simple excitation sismique peut provoquer des collisions entre les différentes structures conduisant à des dégâts très importants.

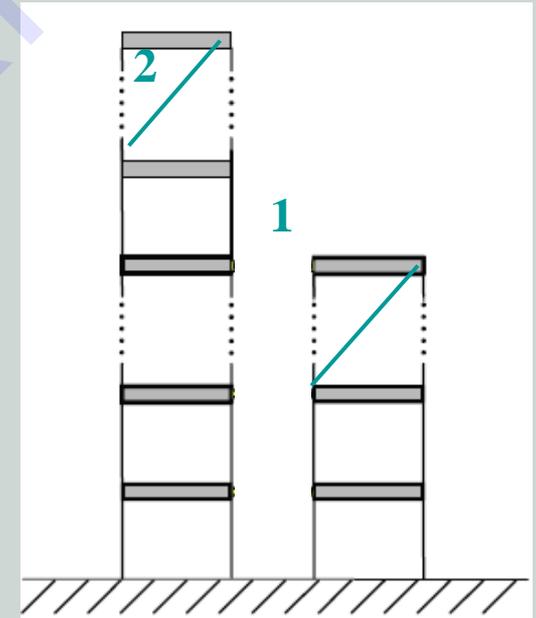


Problème de joint sismique ?

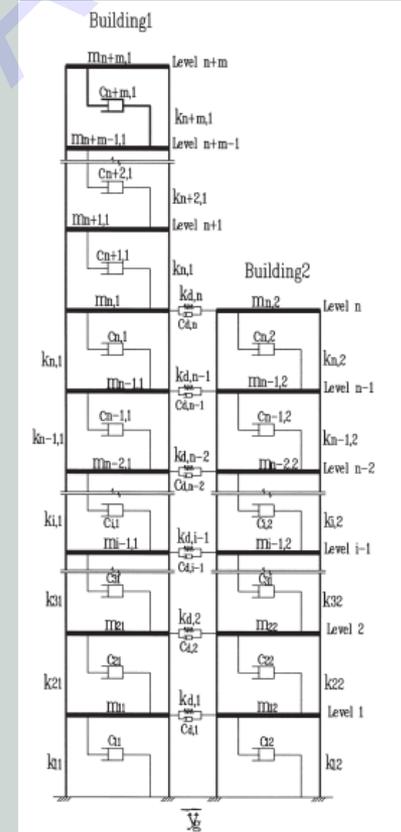
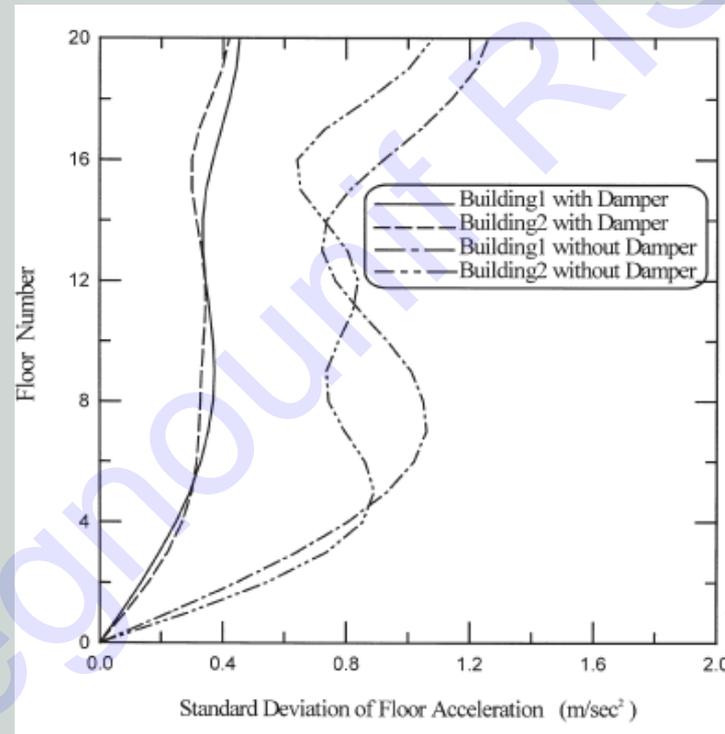
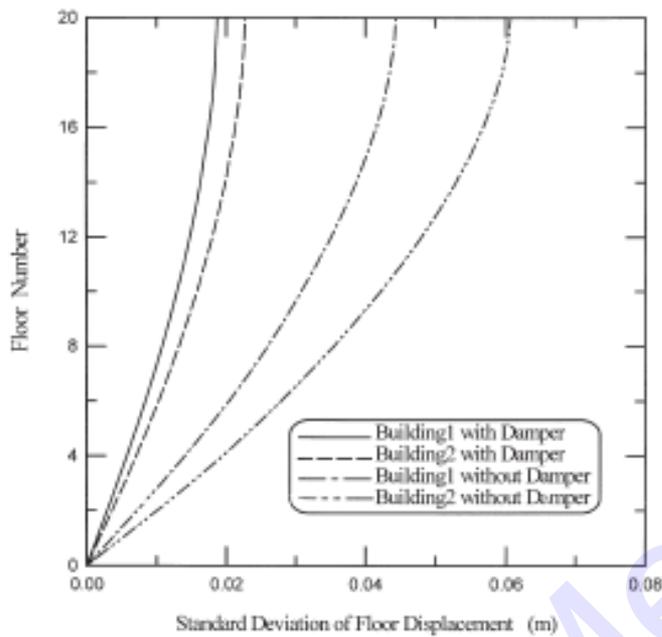
La méthode convenable pour protéger ces bâtiments, c'est la méthode de construction couplée.

De plus, on peut ajouter des systèmes de control qui peuvent aussi aider à réduire les déplacements dynamiques des structures.

**Combinaison Couplage et Contrôle
Conduit à une bonne réduction des
mouvements sismiques.**



La performance des bâtiments adjacents reliés par des amortisseurs viscoélastiques contre les séismes .



Avec des amortisseurs à fluide,

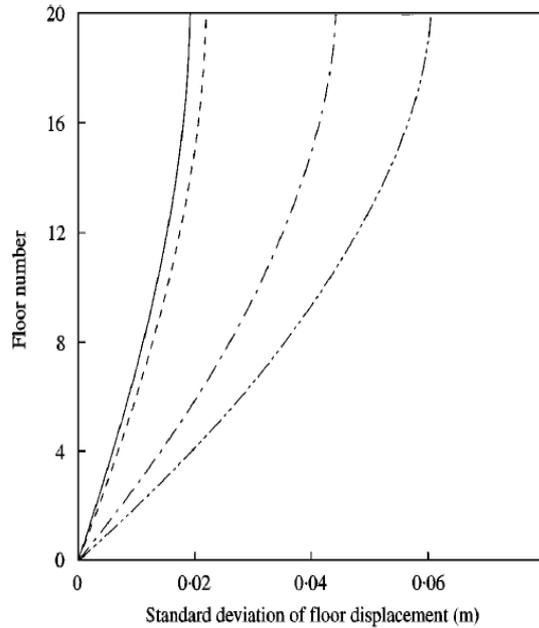


Figure 9. Variations of displacement response of adjacent buildings with height: —, Left building without damper; ---, Right building with damper; - · -, Left building with damper.

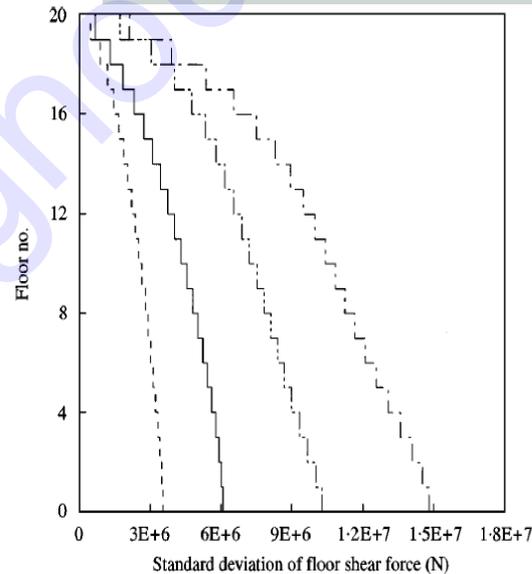
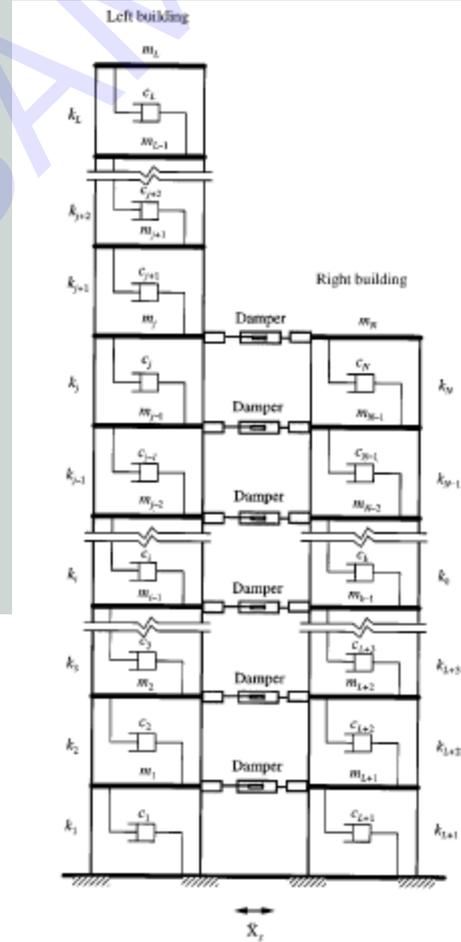
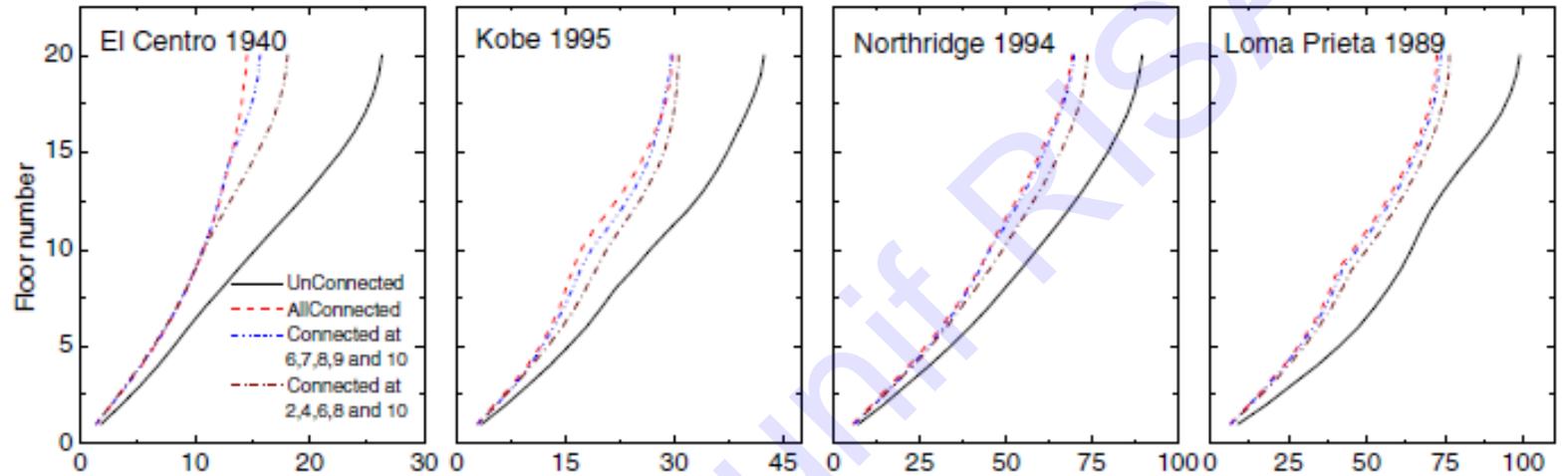


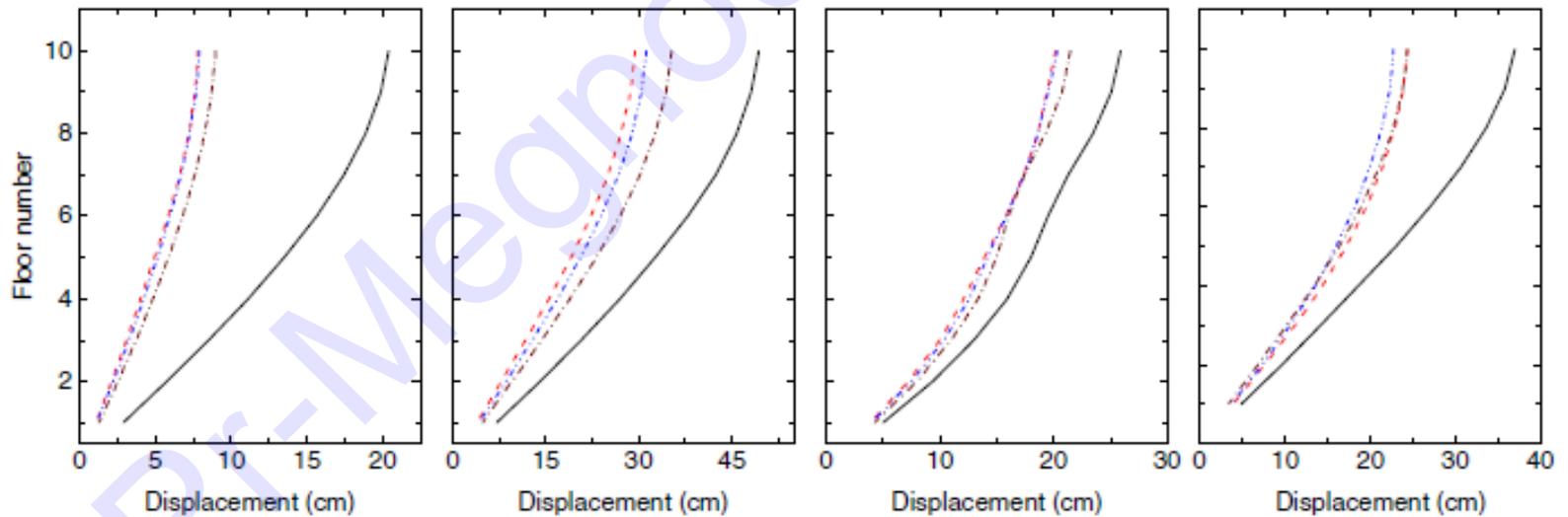
Figure 10. Variations of shear force response of adjacent buildings with height: —, Left building with damper; ---, Right building without damper; - · -, Left building without damper.



Connecté par des amortisseurs visqueux, pour différents séismes



(a) Building1



(b) Building2

Doctorants travaillant dans le domaine du contrôle

N°	Noms et prénoms	Titre	Année
01	Reteri Khadidja	Effet du contrôle vibratoire sur le comportement dynamique des structures adjacentes connectées.	Octobre 2013
02	Chitaoui Houssam Eddine	Optimisation de la position des systèmes de contrôle des structures intelligentes en analyse dynamique.	Octobre 2015
03	Maameri Sana	Etude de l'influence du « Shunt » sur le contrôle des structures intelligentes flexibles en présence d'éléments piézoélectriques.	Octobre 2015
04	Maachou Omar	Le contrôle vibratoire des structures intelligentes par piézoélectricité.	Octobre 2015
05	Bouakkaz Mohammed Amine	Influence des composites à fibres piézo-électriques sur le contrôle vibratoire des structures intelligentes en présence de Shunt	Octobre 2016
06	Berrahou Imed Eddine	Contrôle sismique des structures adjacentes connectées en tenant compte de l'interaction sol-structure.	Octobre 2016



Et Quoi Encore ?

Structures Intelligentes

Abdellatif MEGNOUNIF

Merci