

# Contrôle Actif et Adaptatif des Vibrations Une Perspective Automatique

**I.D. Landau**

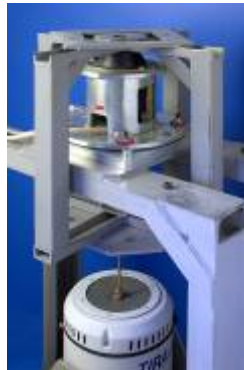
Directeur de Recherche Emérite au CNRS, GIPSA-LAB, Grenoble

avec la collaboration de:

**T. Airimitoiaie** Maître de Conférences, Université de Bordeaux

**A. Castellanos-Silva**, Chercheur, GIPSA-LAB, Grenoble

**M. Alma**, Maître de Conférences, Université de Lorraine



Colloque Analyse Vibrationnelle Expérimentale, Blois, Novembre 2014

## *Atténuer les vibrations est devenu aujourd'hui un objectif important*

- Avions
- Plates-formes spatiales
- Voitures
- Conduits
- Navires
- Transmissions mécaniques
- Immeubles (air conditionné)
- Dispositifs de mémorisation
- .....

Type d'isolation vibrationnelle:

- Passive** – utilisation de matériaux ayant des propriétés d'atténuation
- Semi-active** – changement des propriétés d'atténuation des matériaux
- Active** – utilisation d'une force extérieure pour contrer les vibrations
- Adaptative** – car les caractéristiques des vibrations étant inconnues ou variables, l'adaptation des AVC est nécessaire

AVC= Active Vibration Control System (Contrôle actif de vibrations)

## Contrôle actif de vibrations/ Contrôle actif de bruit

AVC= Active Vibration Control System (Contrôle actif de vibrations)

ANC= Active Noise Control System (Contrôle actif de bruit)

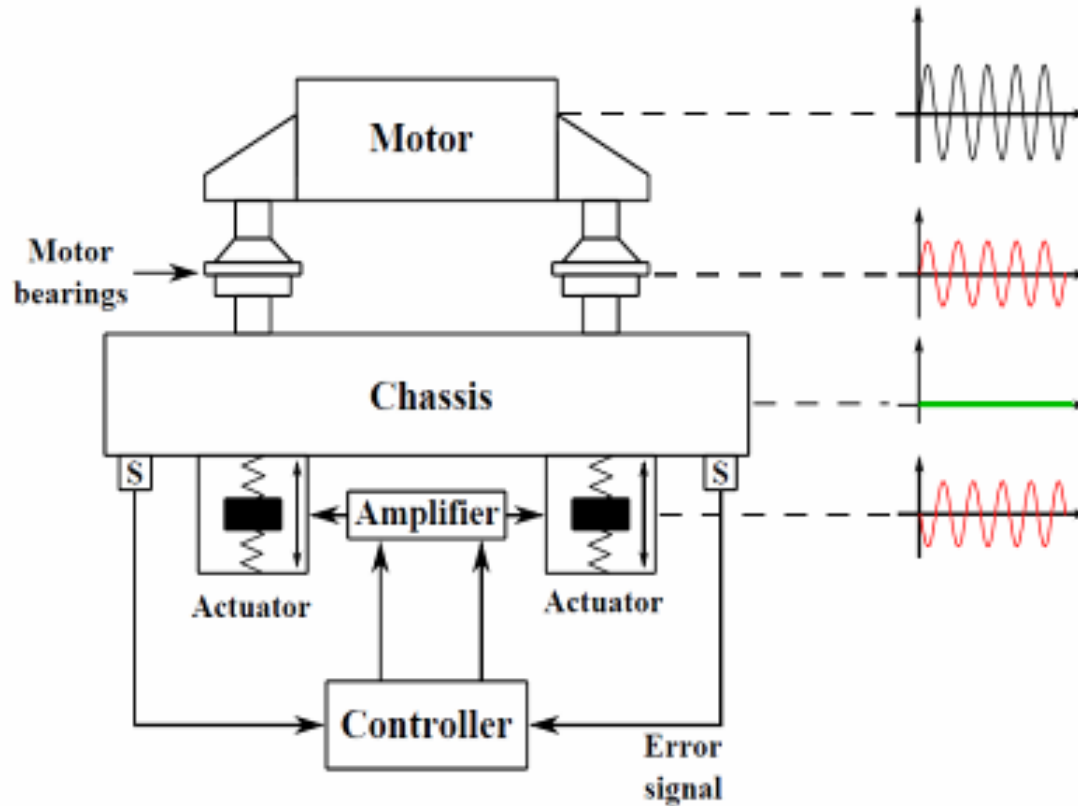
- Les principes sont similaires
- Conséquence: on utilise les mêmes techniques de commande
- Différences : domaine fréquentiel, actionneurs, capteurs

## Thèmes de l'Exposé

- Introduction
- Atténuation de Perturbations "Bande Etroite" multiples Inconnues et Variables par Contre-réaction Adaptative
- Atténuation de Perturbations "Bande Large" par Précompensation Adaptative et Contre-réaction
- Quelques Remarques



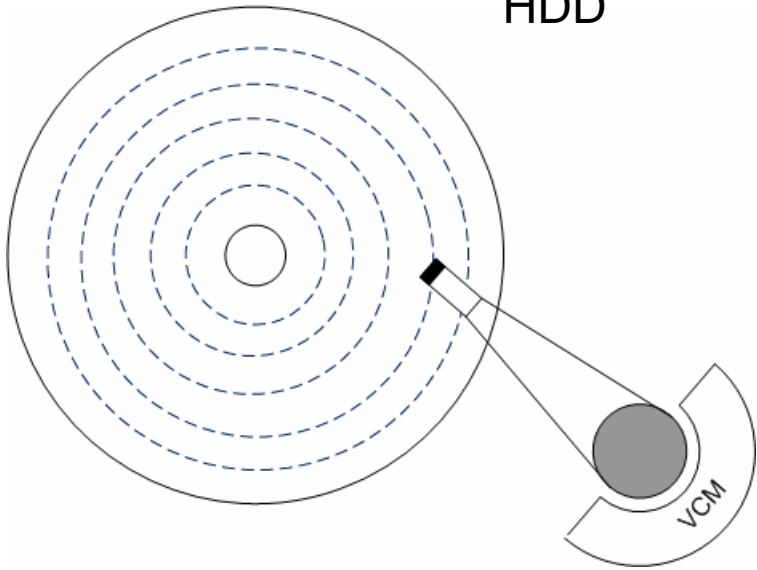
# Exemples de Contrôle Actif de Vibrations



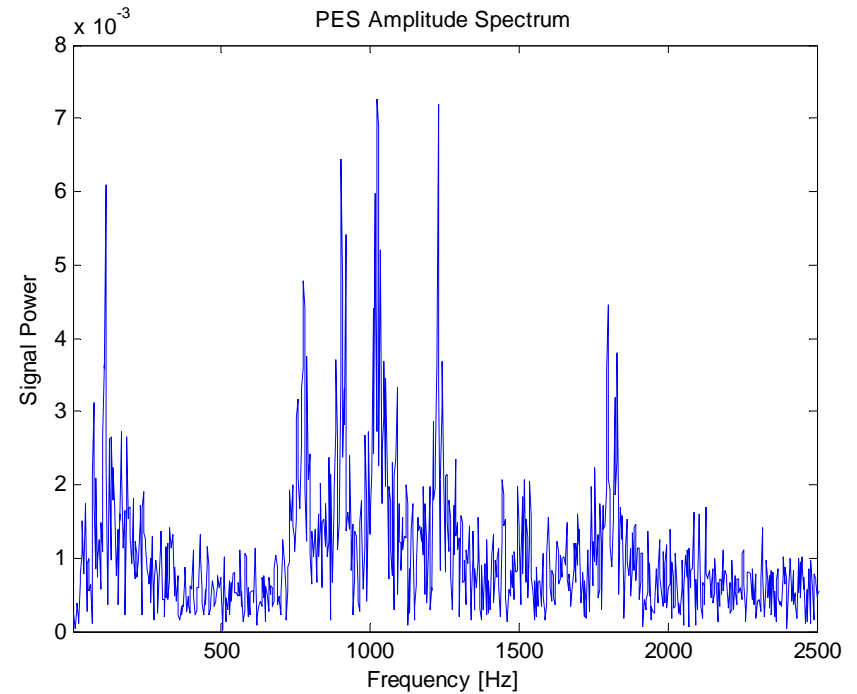
# Vibrations dans les Asservissements des Disques Durs



HDD



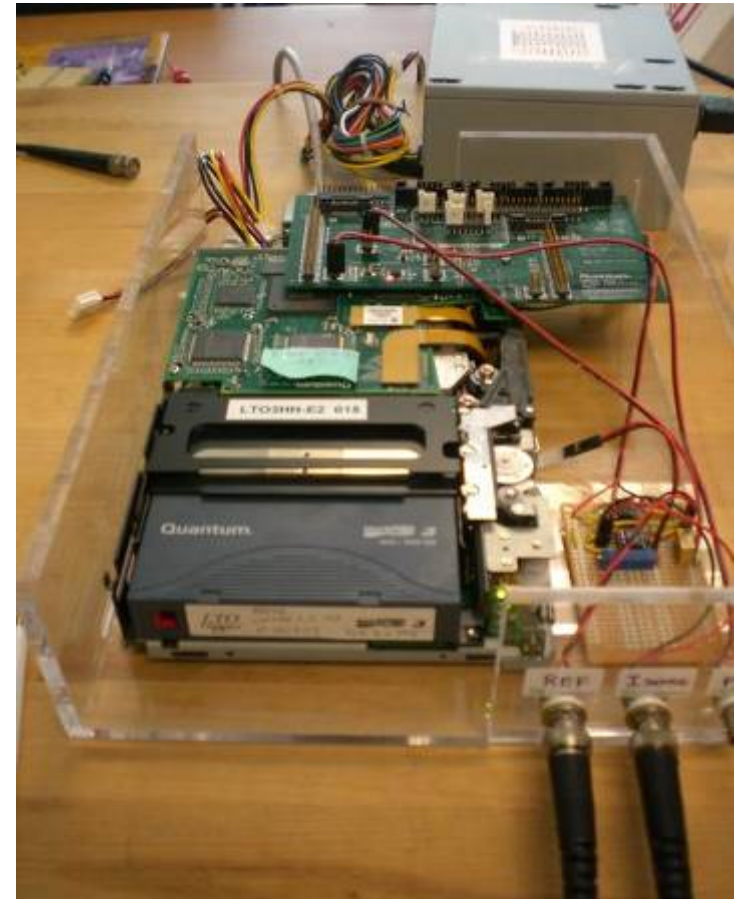
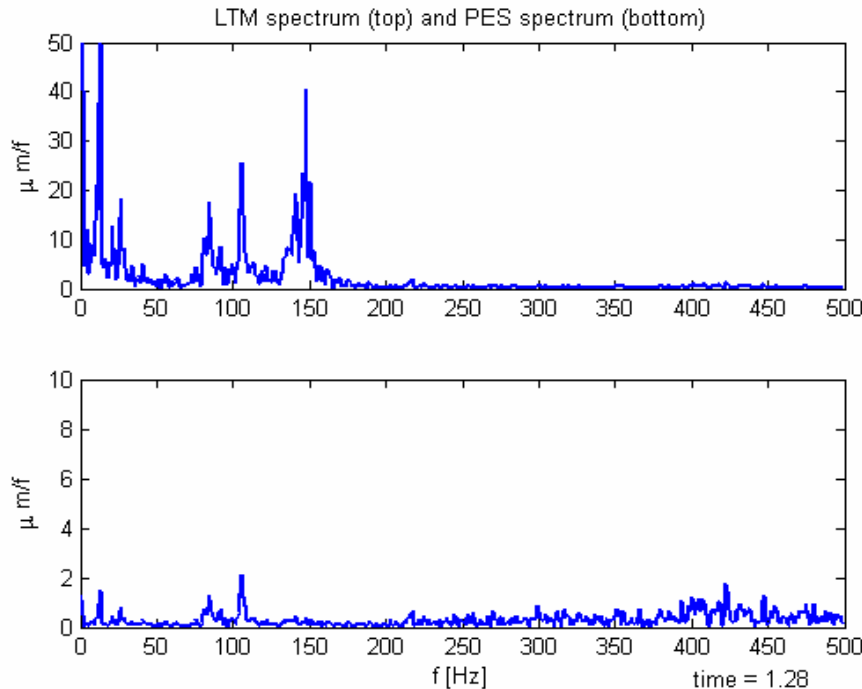
## Position Error Signal



Courtesy of Xu Chen & M. Tomizuka (UCB)  
ECC 13

# Vibrations dans les enregistreurs à bande magnétique

- Applications à la commande de déplacement/vibration d'un enregistreur avec mouvement latéral de la bande
- Perturbations périodiques variables:

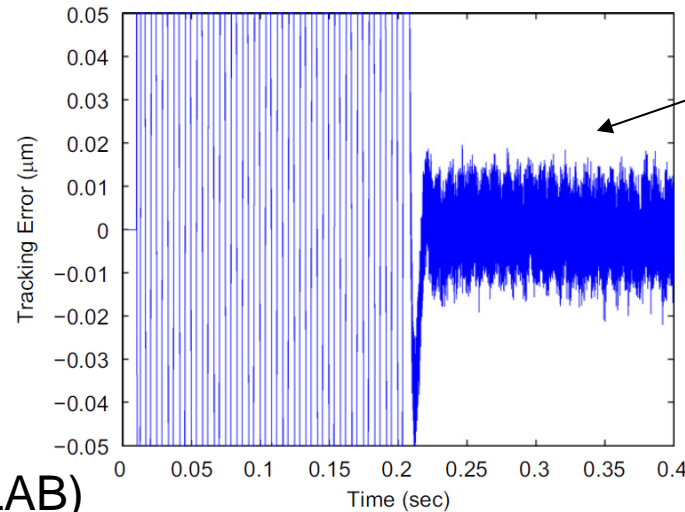
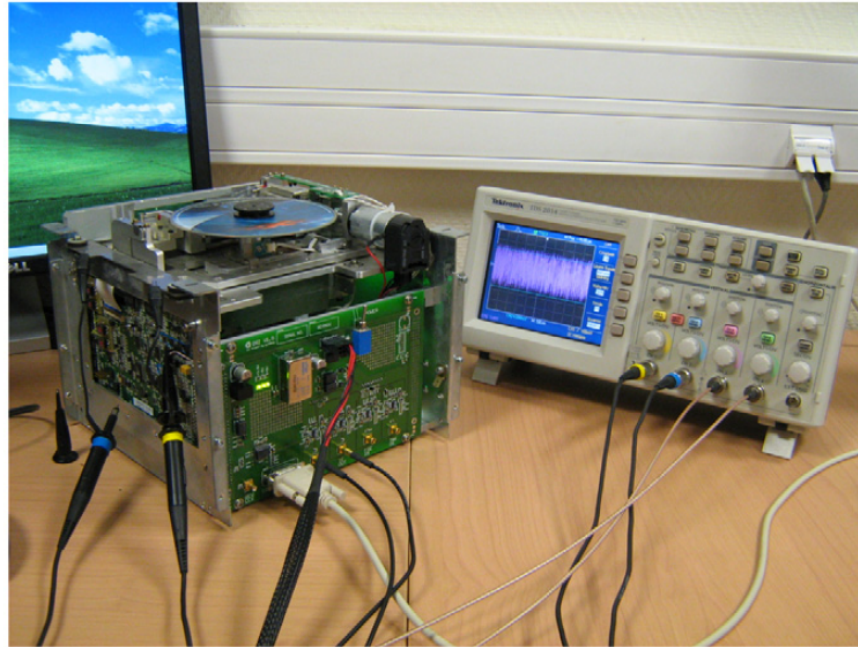


ASME ISPS Conference, July 2013

Courtesy of R. de Callafon (UCSD) – ECC'13

# Atténuation des perturbations périodiques dans les disques Blu-ray

Le testeur  
DaTcube Blu-ray  
(courtesy of Datarius)

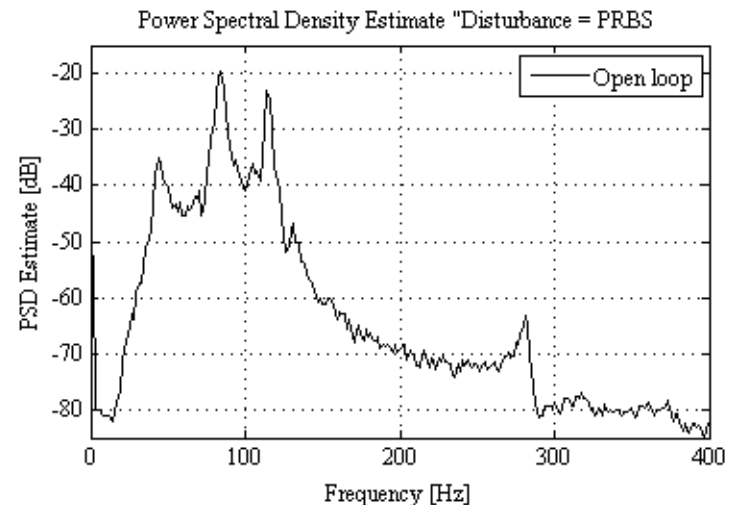
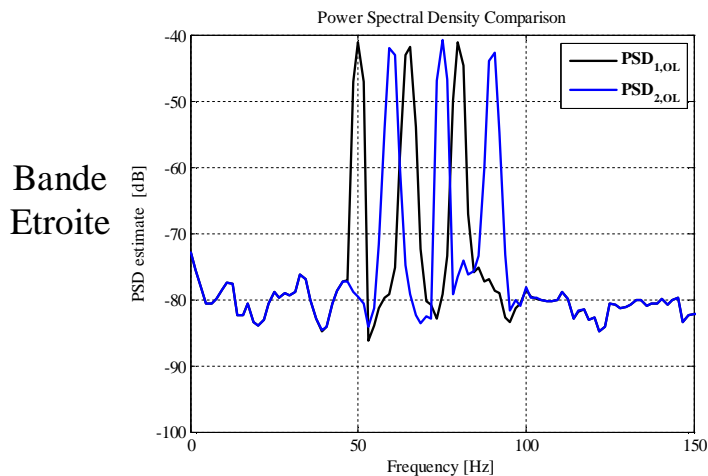


Effet de la compensation  
active adaptative

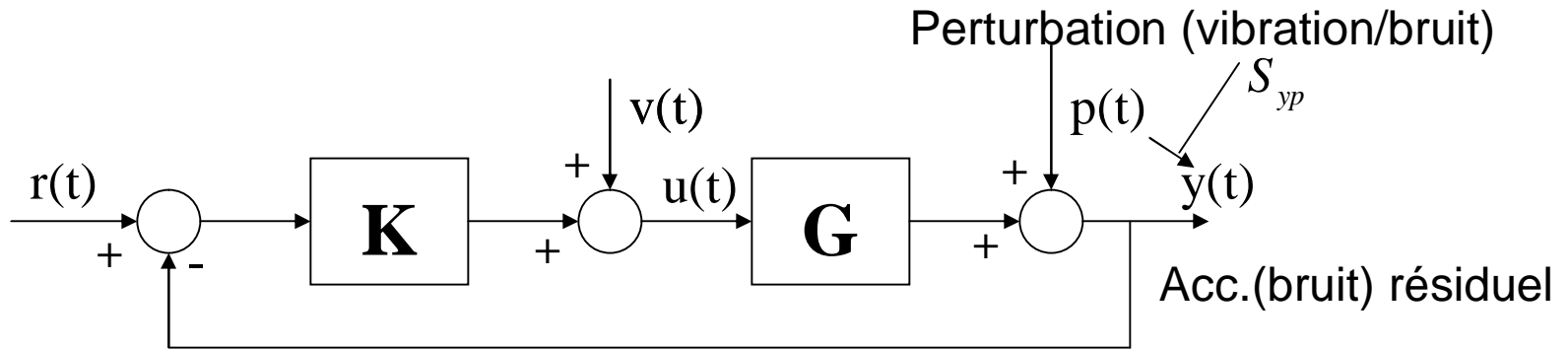
Courtesy of  
J.J. Martinez (GIPSA-LAB)

## Quelques Faits

- En **Contrôle Actif de Vibrations**, les vibrations sont des “**Perturbations**”
- Les Perturbations sont caractérisées par leur contenu en fréquences et leur position dans une certaine région fréquentielle.
- Les Perturbations peuvent être classifiées en “*bande étroite*” et “*bande large*” (la combinaison est possible)
- **La compensation “Feedback” (contre-réaction)** peut être utilisée pour l’atténuation des perturbations tant que l’Intégrale de Bode permet de respecter les spécifications de performance et robustesse.
- **La compensation “Feedforward” (précompensation anticipative)** doit être considérée quand l’effet “water bed” (matelas à eau) dans l’intégrale de Bode devient “inacceptable”
- **L’Adaptation** est nécessaire car les caractéristiques des perturbations sont inconnues et variables dans le temps

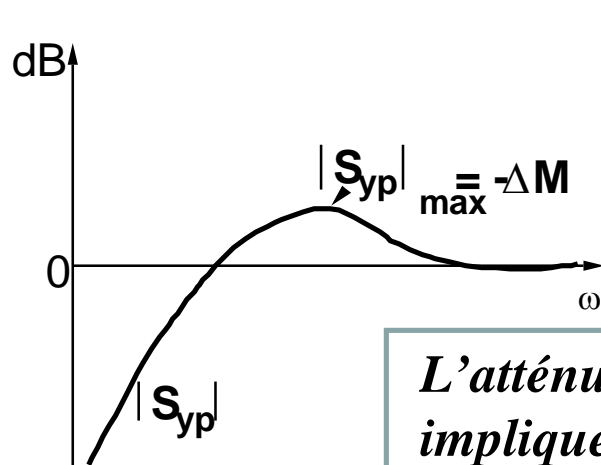


# Compensation par contre-réaction et Intégrale de Bode



$G$  = système de compensation     $K$  = régulateur

Fonction de Sensibilité de Sortie (effet de la perturbation sur la sortie)



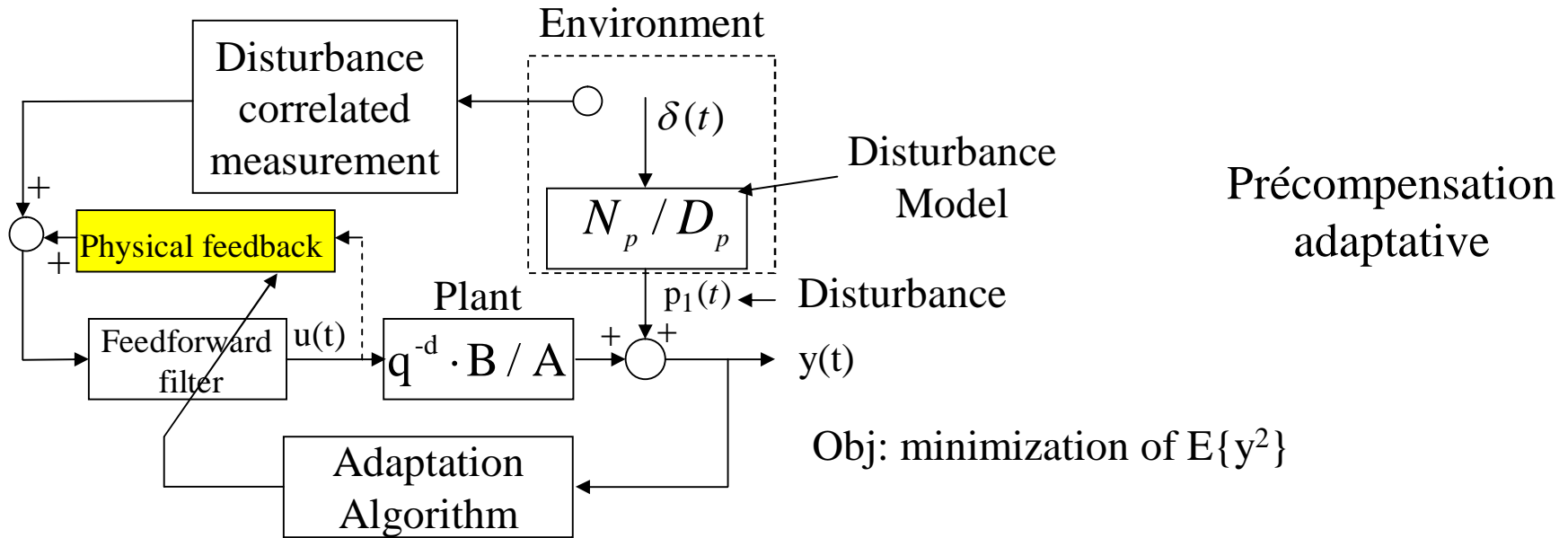
$$S_{yp} = \frac{1}{1 + KG}$$

La somme des aires entre la courbe  $|S_{yp}|$  et l'axe 0dB, prises avec leur signe, est nul (Intégrale de Bode)

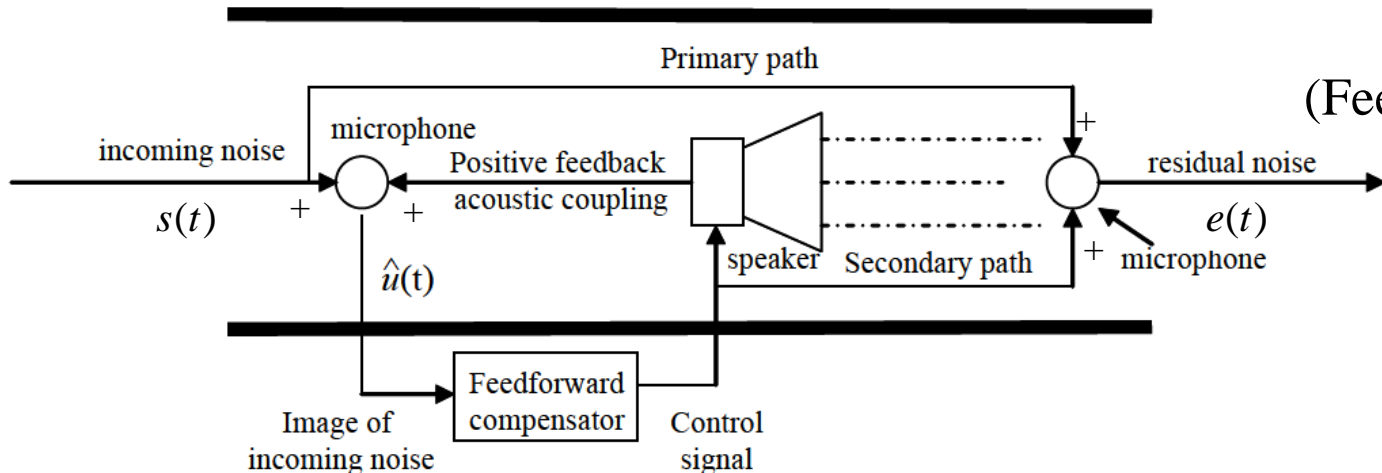
*L'atténuation des perturbations dans une zone de fréquences implique l'amplification des perturbations dans d'autres zones de fréquences (water bed effect)!*

*Difficile d'utiliser le feedback seul pour l'atténuation des perturbations bande large*

# Précompensation des perturbations – Système à contre-réaction



## Réduction du bruit dans les conduits



Un système ANC  
(Feedback interne positif)



## Précompensation des perturbations – Quelques Faits

- Nécessite un capteur additionnel
- Positionnement du capteur souvent difficile
- Dans la plupart des cas, le “feedback positif” ne pourra pas être évité (problème de stabilité)

***Le Feedback*** résulte:

- Du couplage physique interne
- De l’adaptation du précompensateur utilisant la sortie résiduelle

*Le “couplage positif interne” a été reconnu à la fin des années 90*

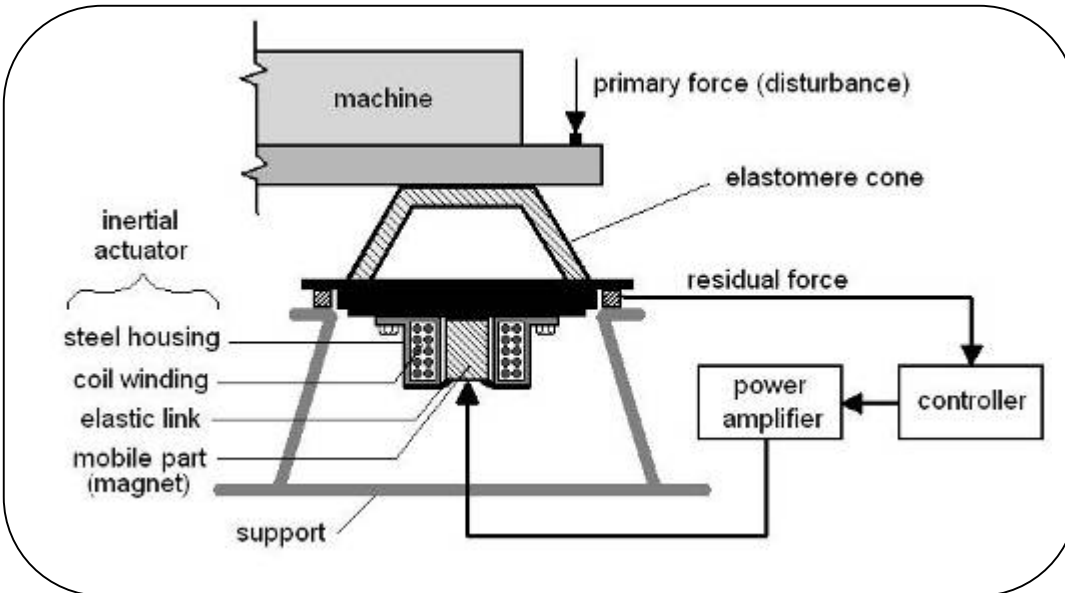


## Identification du modèle dynamique du compensateur

- Pour concevoir une compensation active de vibrations, on a besoin du « modèle dynamique » du système compensateur
- Les modèles « physiques » ne sont pas suffisamment précis et complets
- On obtient le « modèle dynamique » du compensateur par les techniques *d'identification des systèmes*
- « **L'identification de systèmes dynamiques** » est une technique expérimentale utilisée avec succès depuis de nombreuses années
- Des logiciels interactifs particulièrement adaptés aux systèmes mécaniques sont disponibles (ex: **iREG**/Techteam)

# ECC/EJC Benchmark – Banc d'essais

Compensation par feedback de vibrations périodiques multiples inconnues et variables

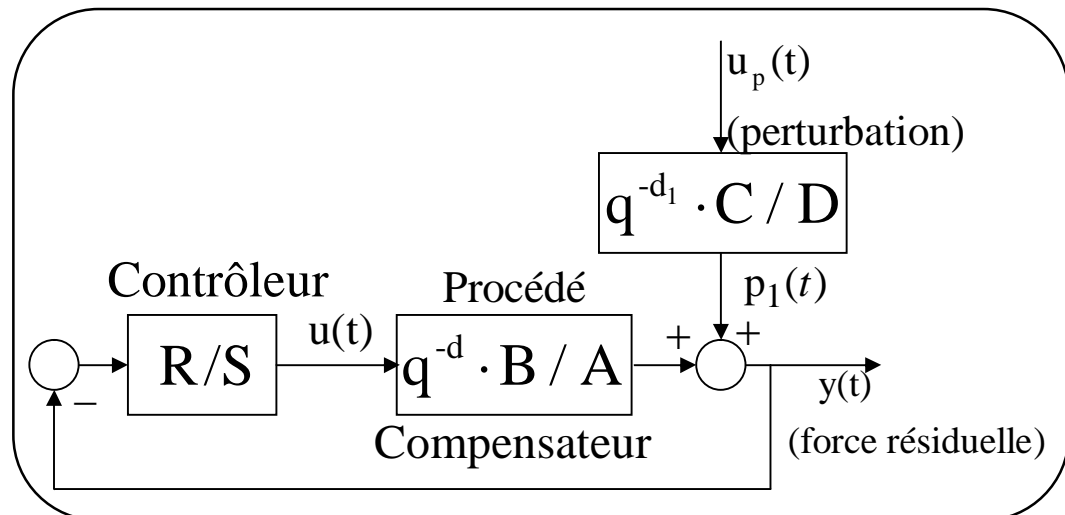


Deux voies:

- Primaire
- Secondaire (compensateur)

Benchmark focalisé sur des tests de:

- 1) **Performance** (spécifications du benchmark)
- 2) **Robustesse** (par rapport aux incertitudes sur le modèle du compensateur et aux scénarii de perturbations)
- 3) **Complexité** (mesurée en termes de durée d'exécution des tâches)

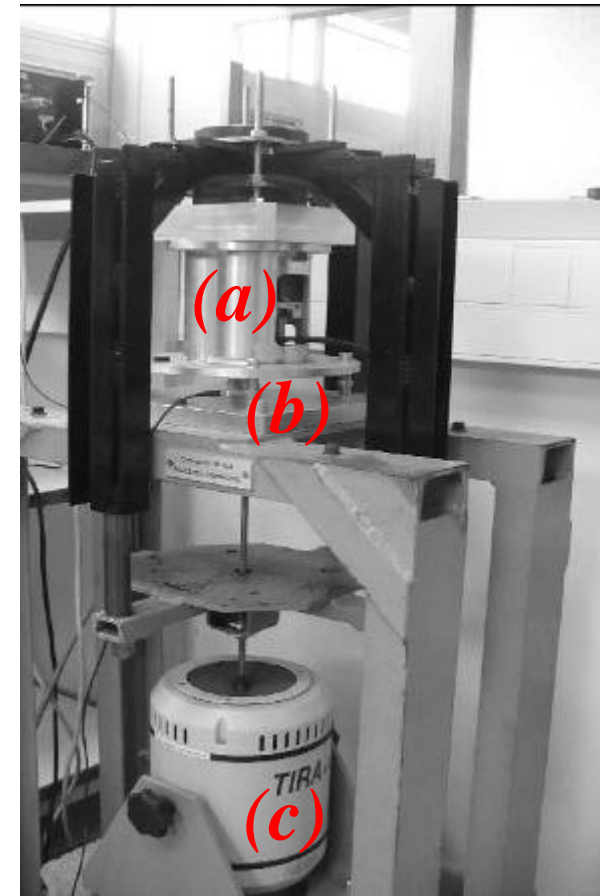
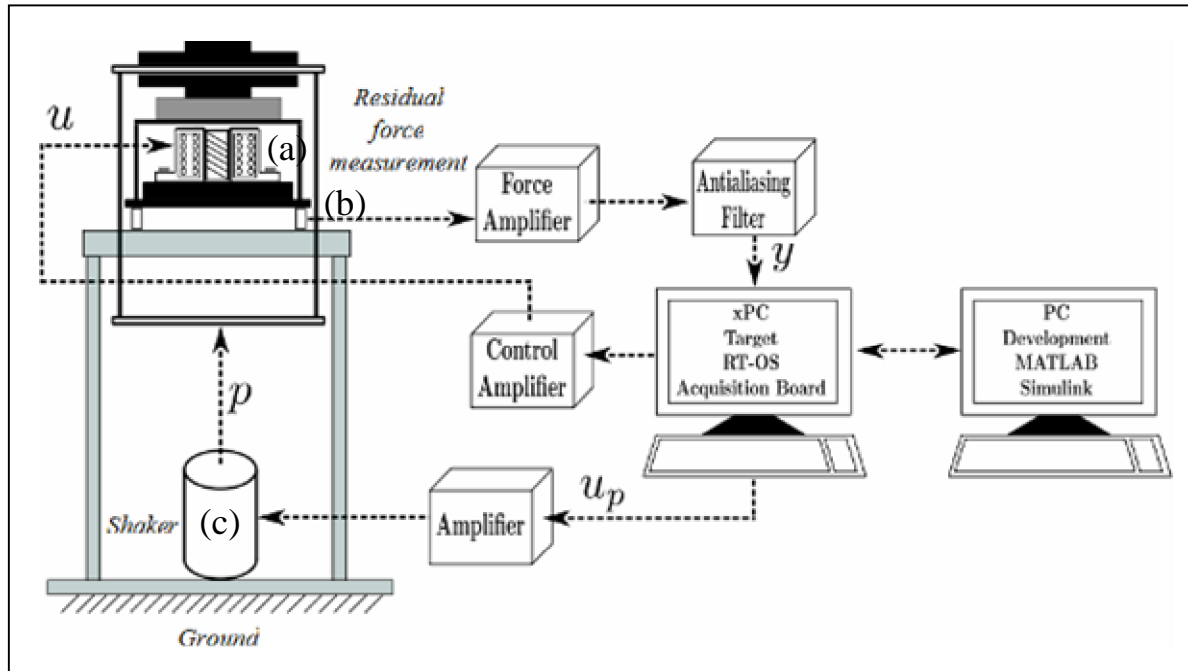


# ECC/EJC Benchmark - Structure du banc d'essais

Un système de contrôle actif (AVC) utilisant :

- *un actionneur inertiel (a)*
- *une mesure de la force résiduelle (b)*
- *un pôt vibrant (c)*

Localisation: GIPSA-Lab, Grenoble (Fr).



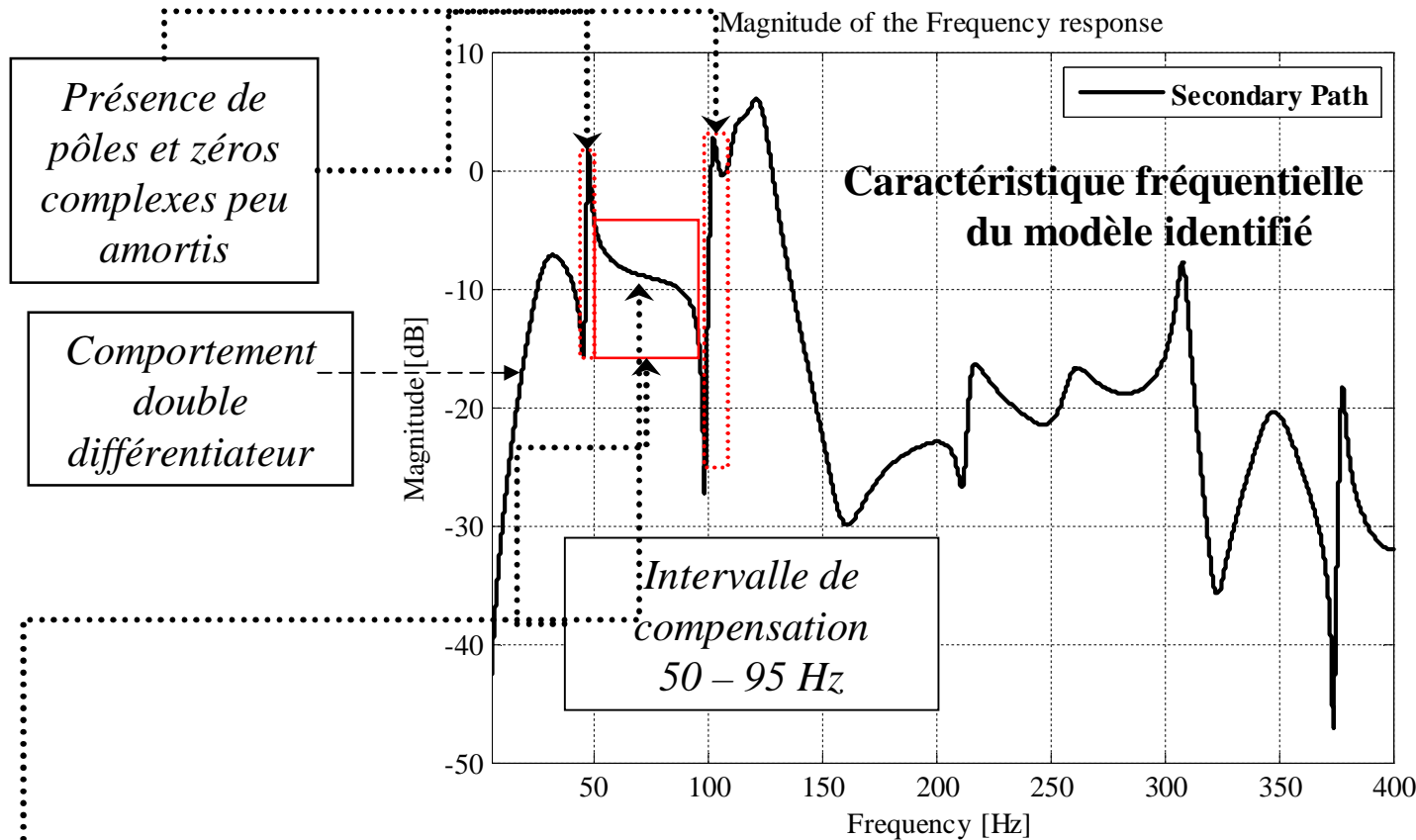
Le banc d'essais

Configuration matérielle du banc d'essais

Période d'échantillonnage:  $T_s = 1.25$  ms

## Modèle identifié de la voie secondaire (compensateur)

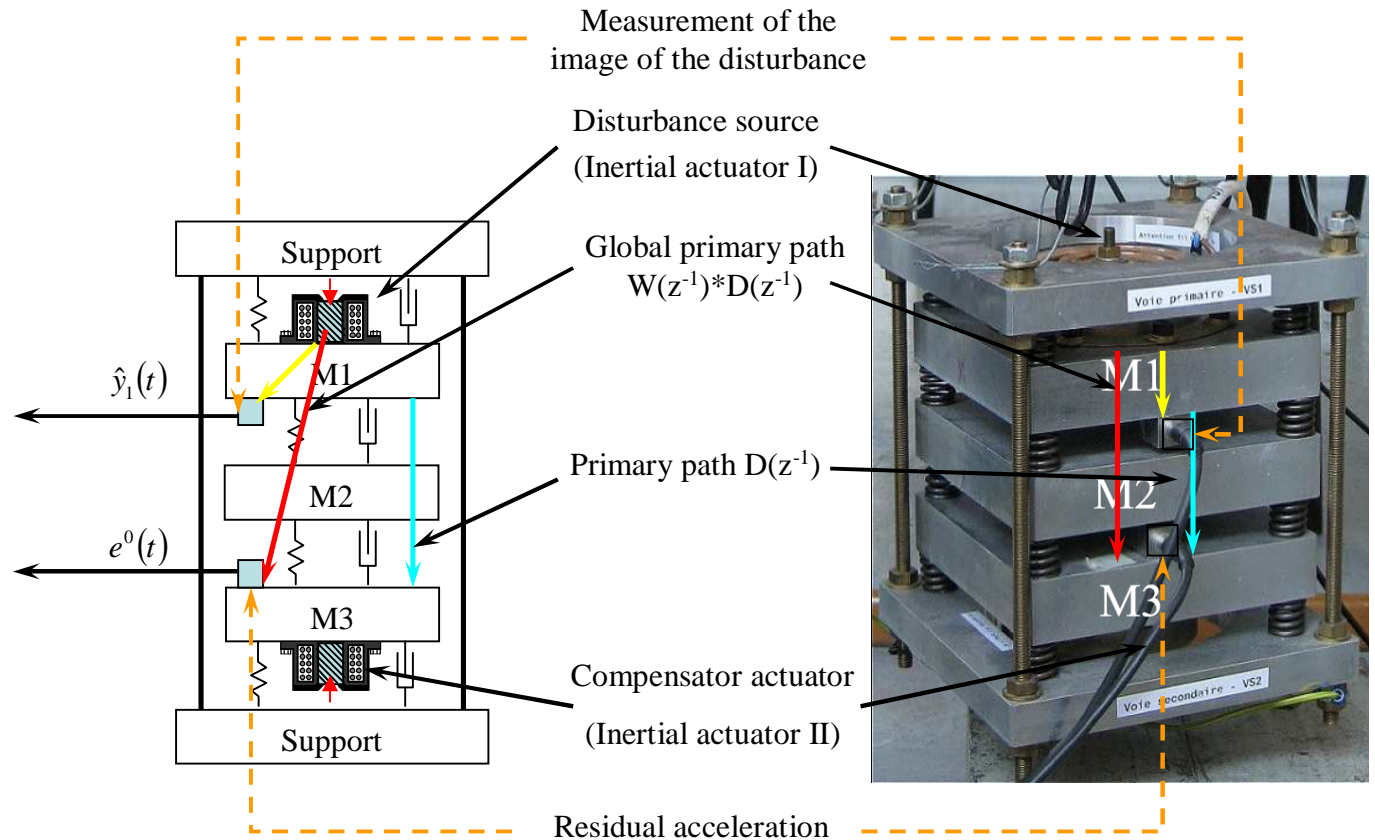
Fonction de transfert: B/A

ordres :  $n_A = 22, n_B = 25$  $F_s = 800\text{Hz}$ 

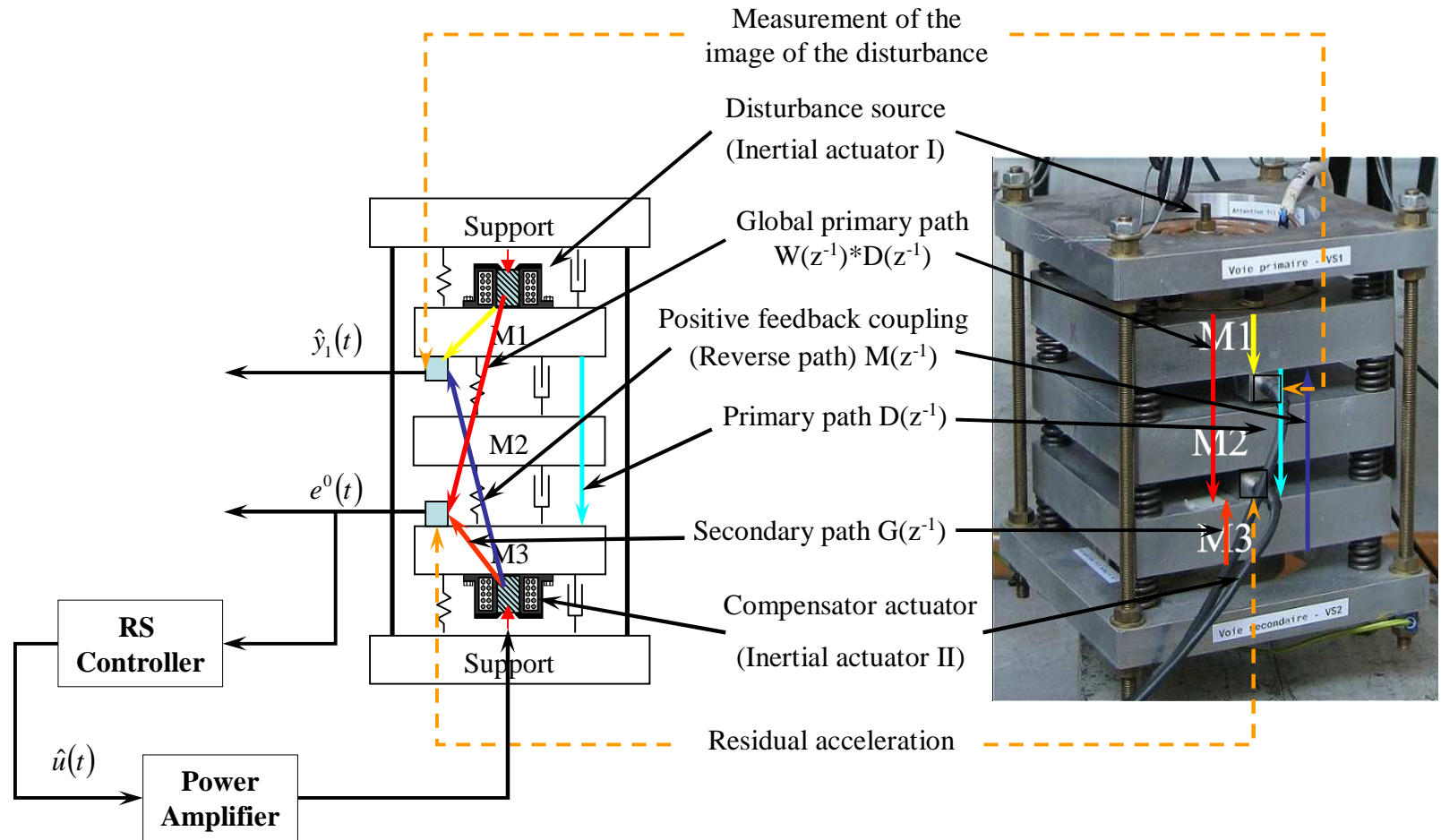
Résonances et antirésonances très peu amorties (amortissement: 0.003 à 0.017)

Pour des raisons de robustesse la compensation se fait uniquement dans les régions fréquentielles où la voie secondaire (compensateur) a un gain suffisant

# Systeme de controle actif des vibrations avec contre-reaction et precompensation

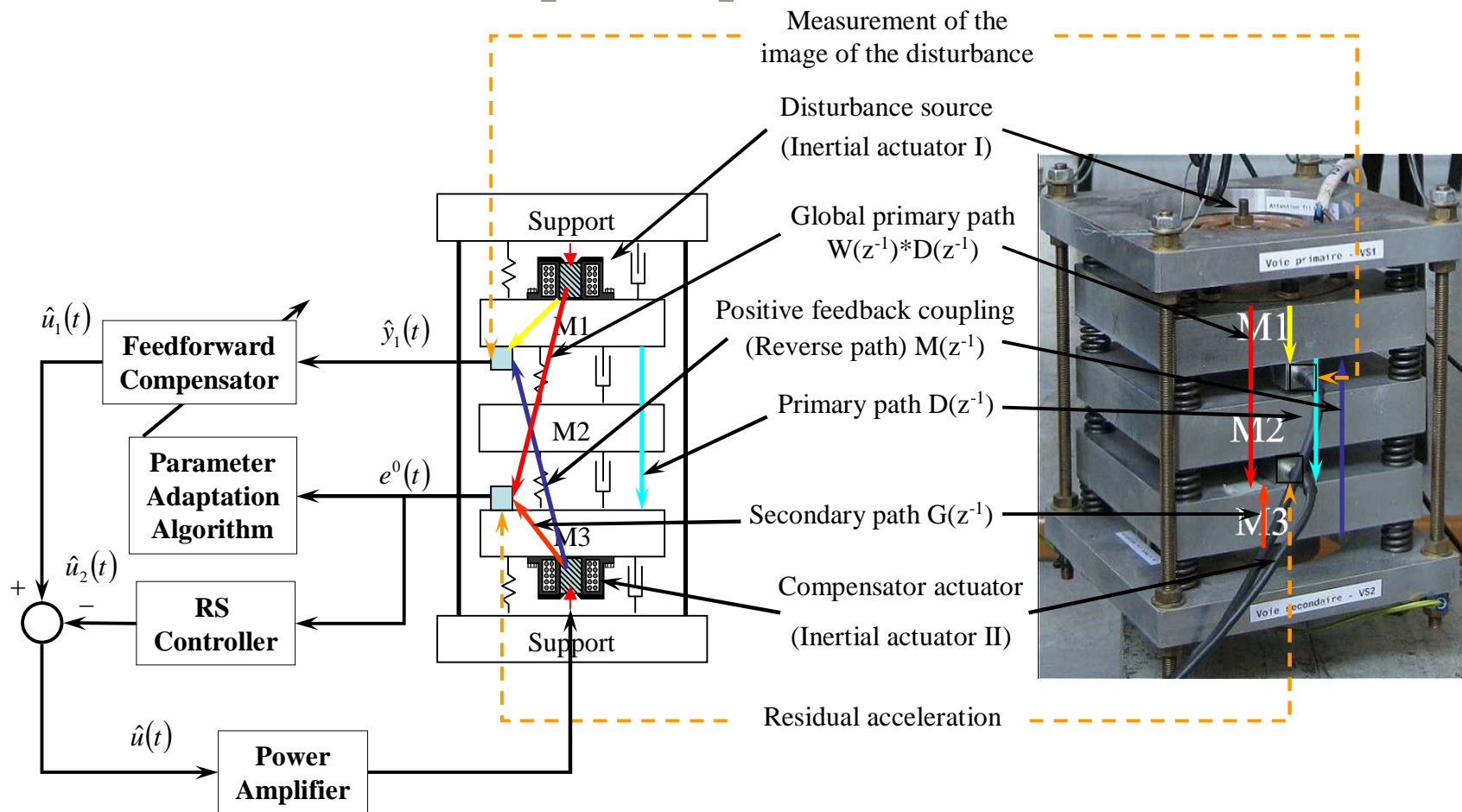


# Systeme de contrôle actif des vibrations avec contre-réaction et précompensation

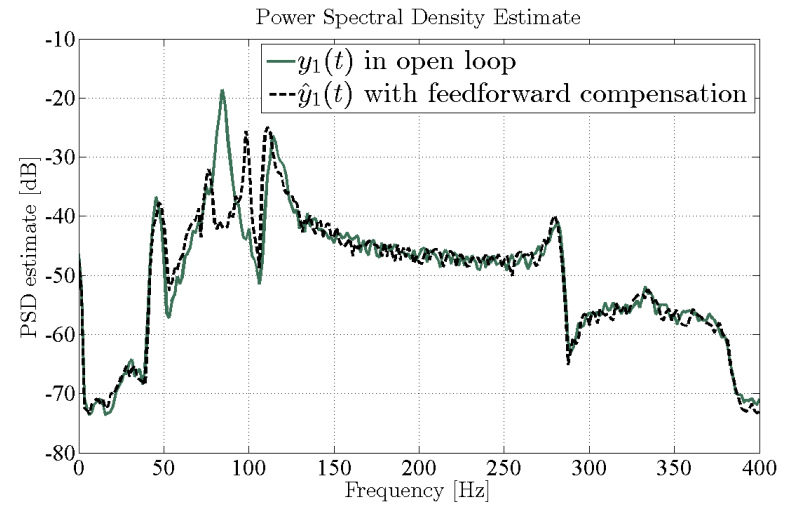
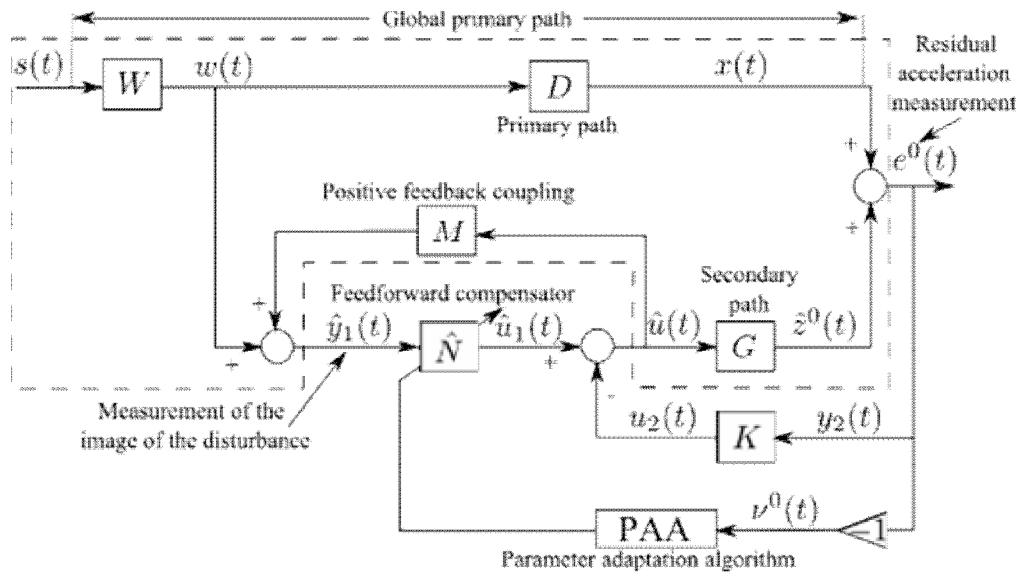
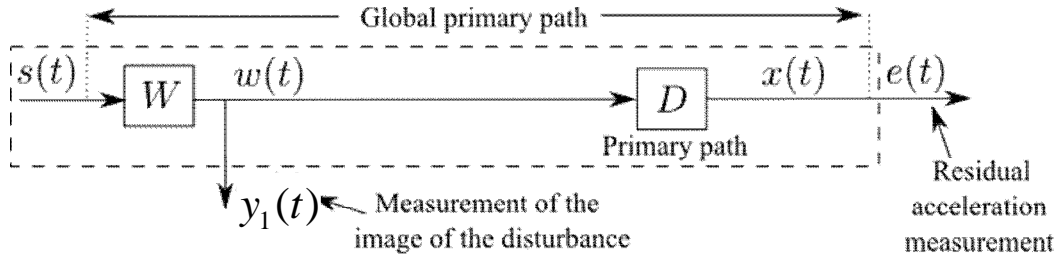




# Systeme de contrôle actif des vibrations avec contre-réaction et précompensation



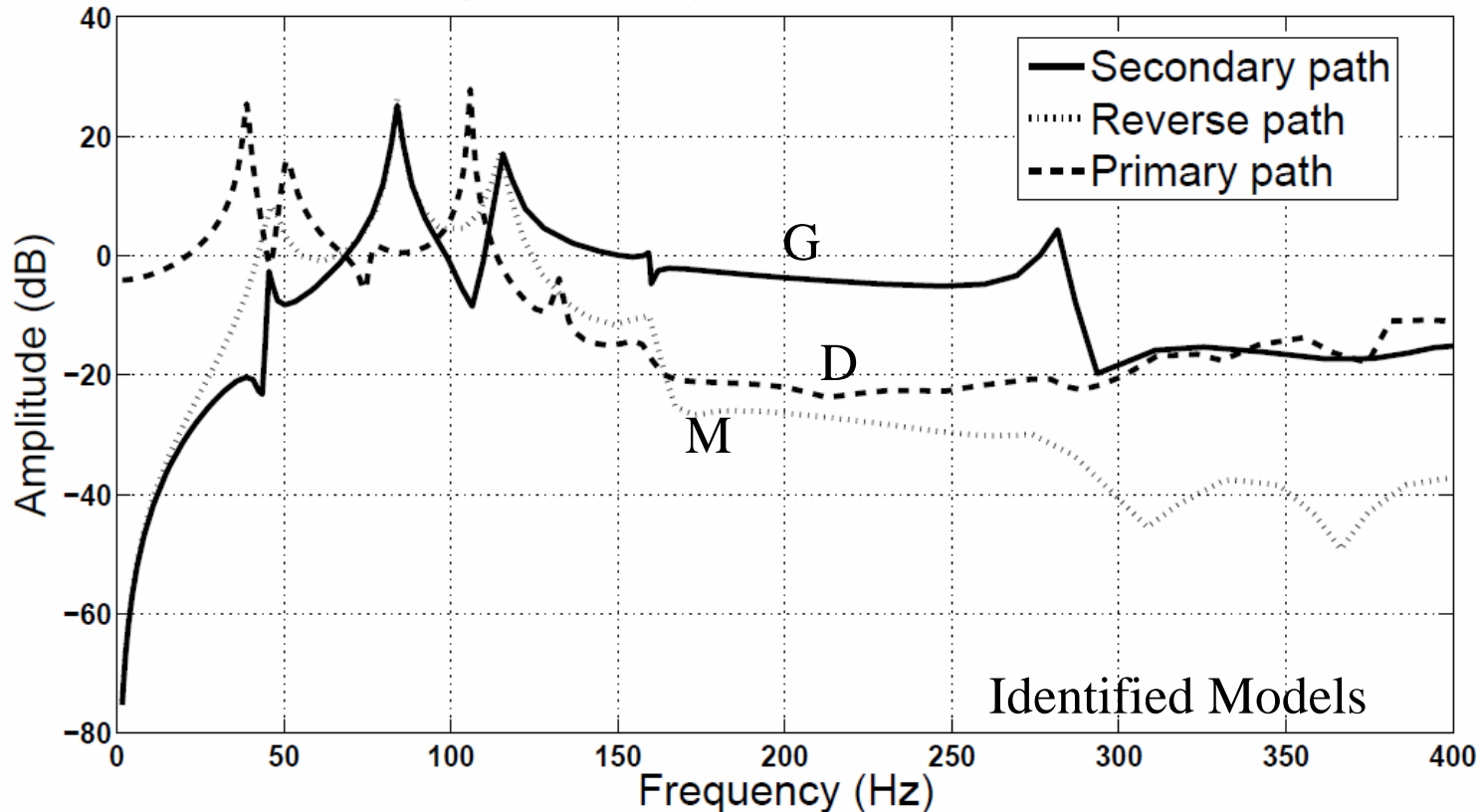
# Effet du "couplage interne positif"





# Caractéristiques Fréquentielles

Primary, Secondary and Reverse Paths Models



Complexity of the models ( $TF = B_x / A_x$ ):

$$n_{B_D} = 26, \quad n_{A_D} = 26; \quad n_{B_G} = 17, \quad n_{A_G} = 15; \quad n_{B_M} = 16, \quad n_{A_M} = 16;$$

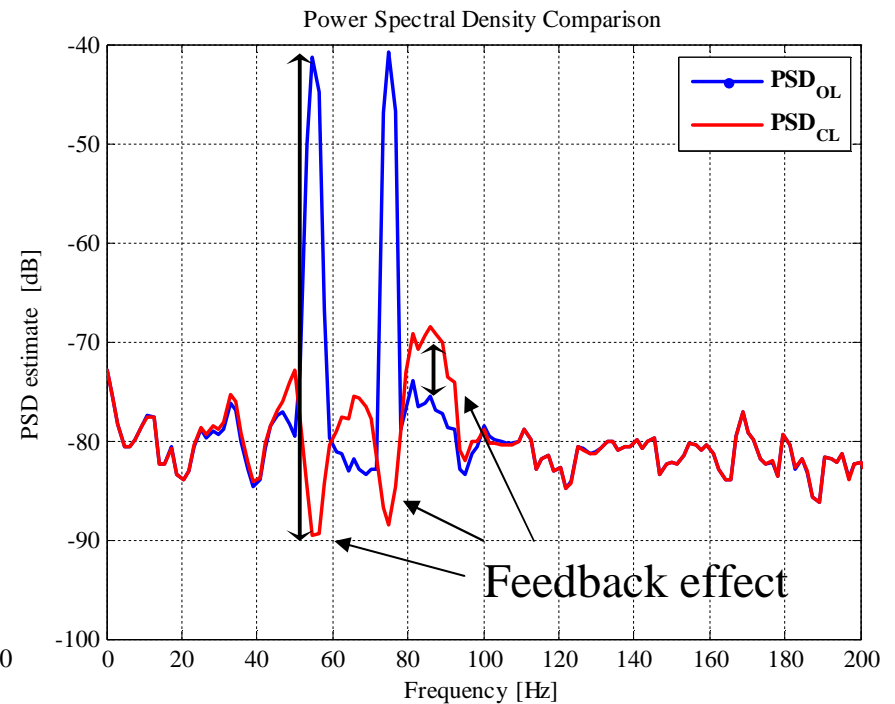
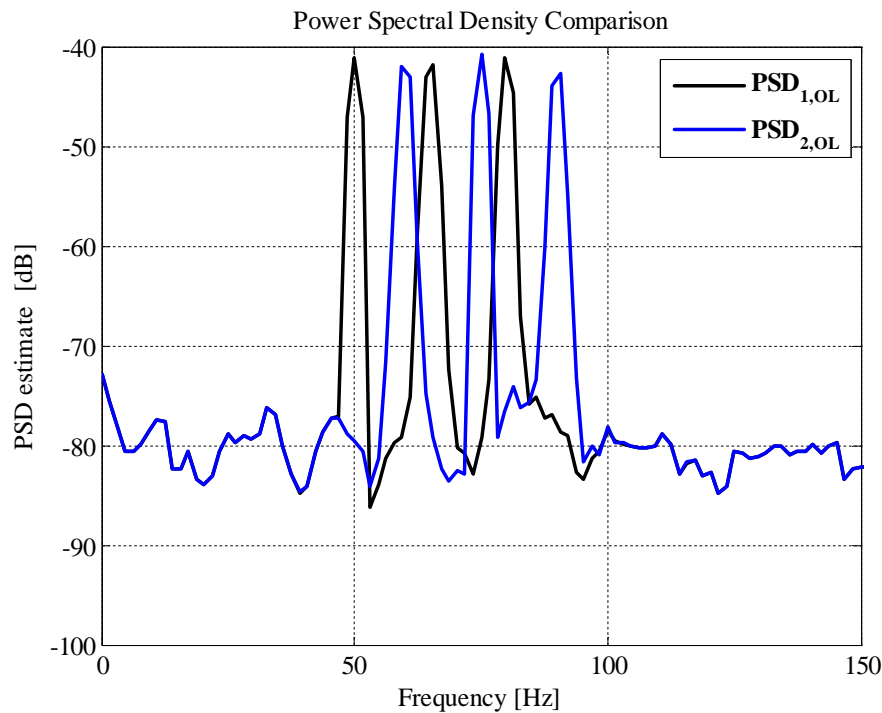
primary
secondary
reverse

Rem: la voie secondaire a une antirésonance à 108 Hz où la voie primaire a une résonance

**Attenuation de perturbations “bande étroite” multiples  
inconnues et variables par contre-réaction adaptative**

## Quelques faits

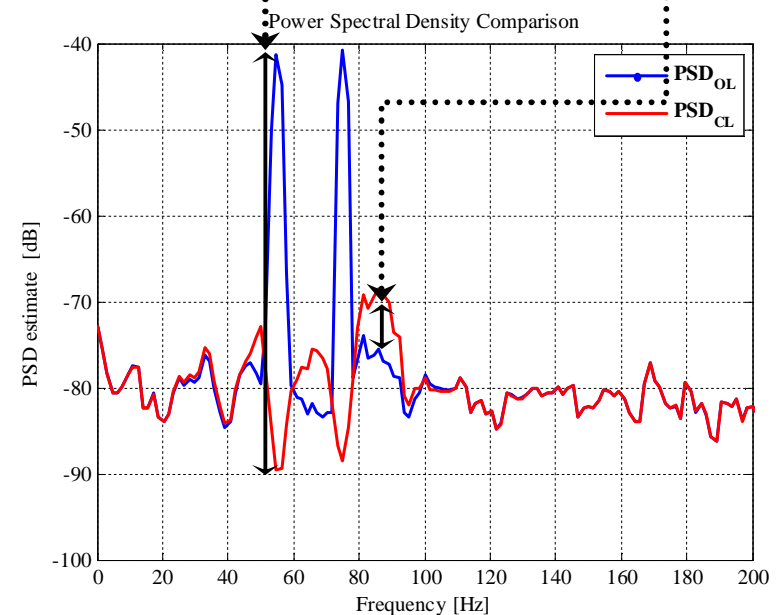
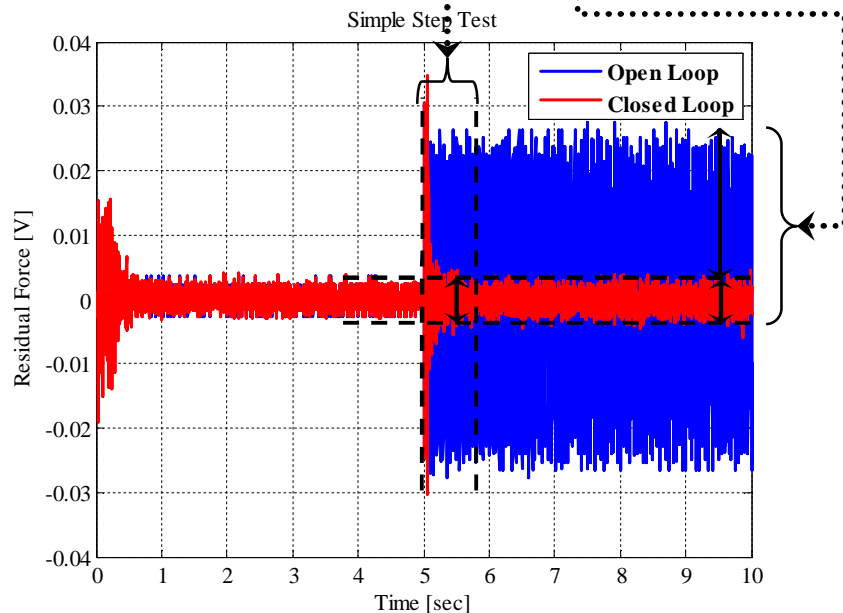
- Dans de nombreuses applications, l'atténuation active de perturbations "bande étroite" multiples se pose.
- *L'Adaptation* est nécessaire car les caractéristiques de ces perturbations bande étroite sont inconnues et variables dans le temps.
- Le *Feedback (régulation)* peut être utilisé pour l'atténuation de ces perturbations (pas besoin de capteurs additionnels)



# Atténuation adaptative des perturbations "bande étroite"

## Terminologie

Transient Duration $TD(s)$	Global Attenuation $GA(dB)$	Disturbance Attenuation $DA(dB)$	Maximum Amplification $MA(dB)$
-------------------------------	--------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------



Réponse temporelle (gauche) et PSD (droite) pour réjection simultanée de deux perturbations sinusoïdales [55,75] Hz appliquées à  $t=5s$ .

# Atténuation de perturbations bande étroite inconnues

**Hypothèse:** Modèle du compensateur connu et presque constant  
(*obtenu par identification*)

**Problème:** Atténuation de perturbations bande étroite multiples inconnues et variables seulement par *contre-réaction* (feedback)

**Solution:** *Régulation par contre-réaction adaptative*

- *Régulation adaptative directe*
- *Régulation adaptative indirecte*

Un benchmark international dédié à l'atténuation adaptative par feedback a été organisé.

Les résultats sont disponibles:

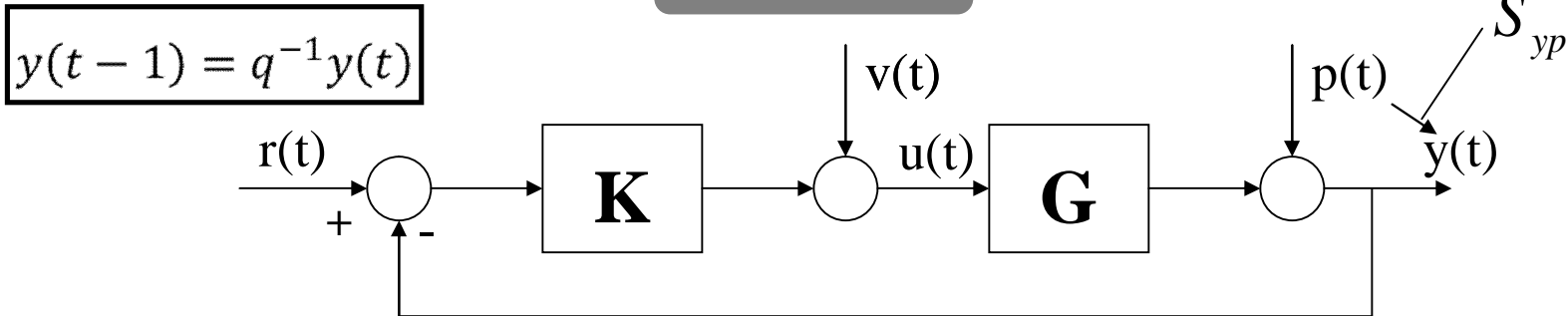
European J. of Control no. 4, 2013, Special Issue

Web site:

[http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/~ioandore.landau/benchmark\\_adaptive\\_regulation/](http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/~ioandore.landau/benchmark_adaptive_regulation/)



## Notations



$$G(q^{-1}) = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

$$K(q^{-1}) = \frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{R'(q^{-1})H_R(q^{-1})}{S'(q^{-1})H_S(q^{-1})}$$

$H_R$  and  $H_S$  sont préséparés

Fonction de Sensibilité de sortie:

$$S_{yp}(q^{-1}) = \frac{1}{1 + KG} = \frac{A(q^{-1})S'(q^{-1})H_S(q^{-1})}{P(q^{-1})}$$

Pôles de la boucle fermée:  $P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + z^{-d} B(q^{-1})R(q^{-1})$

*Le gain de  $S_{yp}$  est nul aux fréquences où  $S_{yp}(e^{-j\omega})=0$   
(atténuation parfaite de la perturbation à cette fréquence)*

## Modèle de Perturbation

### *Contexte Déterministe*

$$p(t) = \frac{N_p(q^{-1})}{D_p(q^{-1})} \cdot \delta(t) : \text{perturbation déterministe}$$

$D_p \rightarrow$  pôles sur le cercle unité;  $\delta(t) = \text{Dirac}$

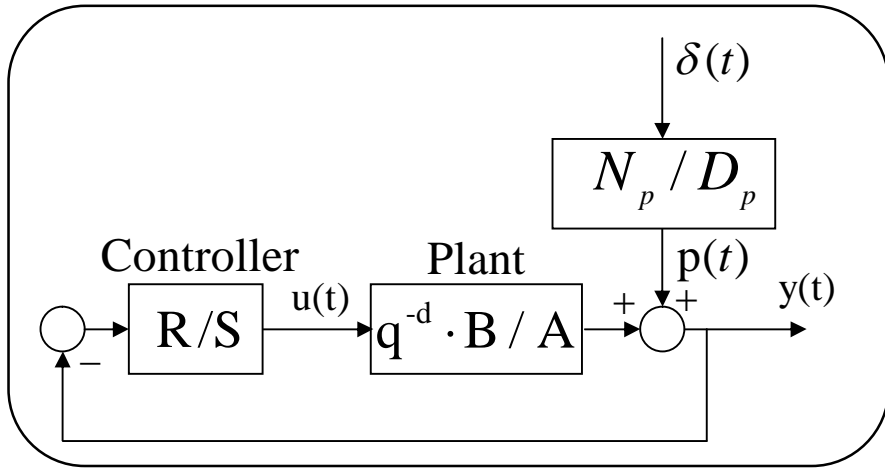
### *Contexte Stochastique*

$$p(t) = \frac{N_p(q^{-1})}{D_p(q^{-1})} \cdot e(t) : \text{perturbation stochastique}$$

$D_p \rightarrow$  pôles sur le cercle unité;  $e(t) = \text{séquence bruit blanc gaussienne } (0, \sigma)$

Comment obtenir une “atténuation totale” de la perturbation?  
Réponse : En utilisant le “Principe du Modèle Interne”

# Principe du Modèle Interne (IMP)



$$p(t) = \frac{N_p(q^{-1})}{D_p(q^{-1})} \cdot \delta(t) : \text{perturbation déterministe}$$

$D_p \rightarrow$  pôles sur le cercle unité;  $\delta(t) =$  Dirac

Régulateur :

$$R(q^{-1}) = R'(q^{-1}) \cdot H_R(q^{-1});$$

$$S(q^{-1}) = S'(q^{-1}) \cdot H_S(q^{-1}).$$

Principe du Modèle Interne:  $H_S(q^{-1}) = D_p(q^{-1})$

(le régulateur doit contenir le modèle de la perturbation)

$$\text{Sortie : } y(t) = \frac{A(q^{-1})S(q^{-1})}{P(q^{-1})} \cdot p(t) = S_{yp}(q^{-1}) \cdot p(t) \longrightarrow y(t) = \frac{A(q^{-1}) \underbrace{H_S(q^{-1})}_{D_p(q^{-1})} S'(q^{-1})}{P(q^{-1})} \cdot \underbrace{\frac{N_p(q^{-1})}{D_p(q^{-1})}}_{D_p(q^{-1})} \times \delta(t)$$

$$\text{Poles BF : } P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + z^{-d} B(q^{-1})R(q^{-1})$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0$$

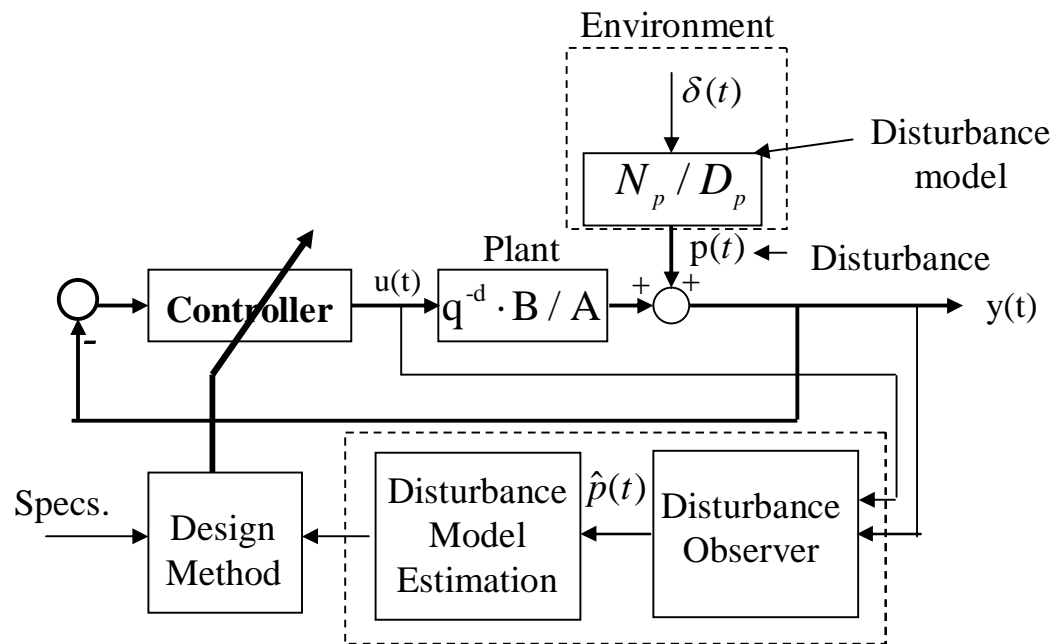
*Pour des raisons de robustesse, la compensation se fait uniquement dans les régions fréquentielles où la voie secondaire (compensateur) a un gain suffisant*



# Régulation adaptative indirecte

Méthodologie en deux étapes:

1. Estimation du modèle de la perturbation  $D_p(q^{-1})$  (notée  $\hat{D}_p(q^{-1})$ )
2. Calcul du régulateur en imposant:  $H_s(q^{-1}) = \hat{D}_p(q^{-1})$



*Temps de calcul important (si la FT du compensateur est d'un ordre élevé)*

# Principe du Modèle Interne et Q-paramétrisation)

**Q-paramétrisation (Youla-Kucera) :**

$$R(q^{-1}) = R_0(q^{-1}) + A(q^{-1})Q(q^{-1});$$

$$S(q^{-1}) = S_0(z^{-1}) - q^{-d}B(q^{-1})Q(q^{-1}).$$

Commande:  $S(q^{-1})u(t) = -R(q^{-1})y(t)$

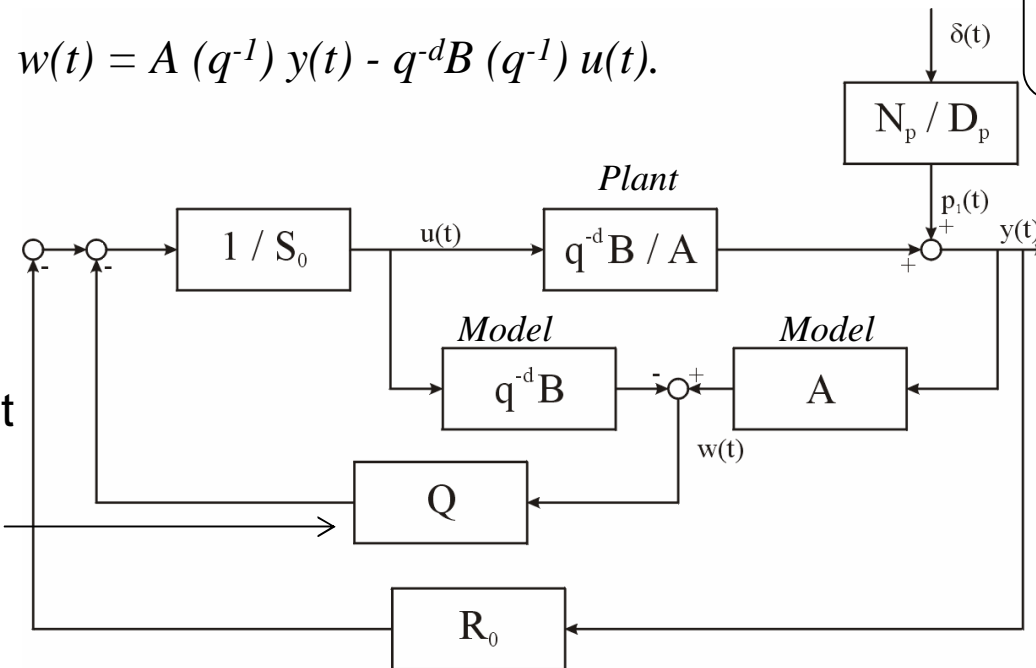
$$S_0(q^{-1})u(t) = -R_0(q^{-1})y(t) - Q(q^{-1})w(t),$$

où:  $w(t) = A(q^{-1})y(t) - q^{-d}B(q^{-1})u(t).$

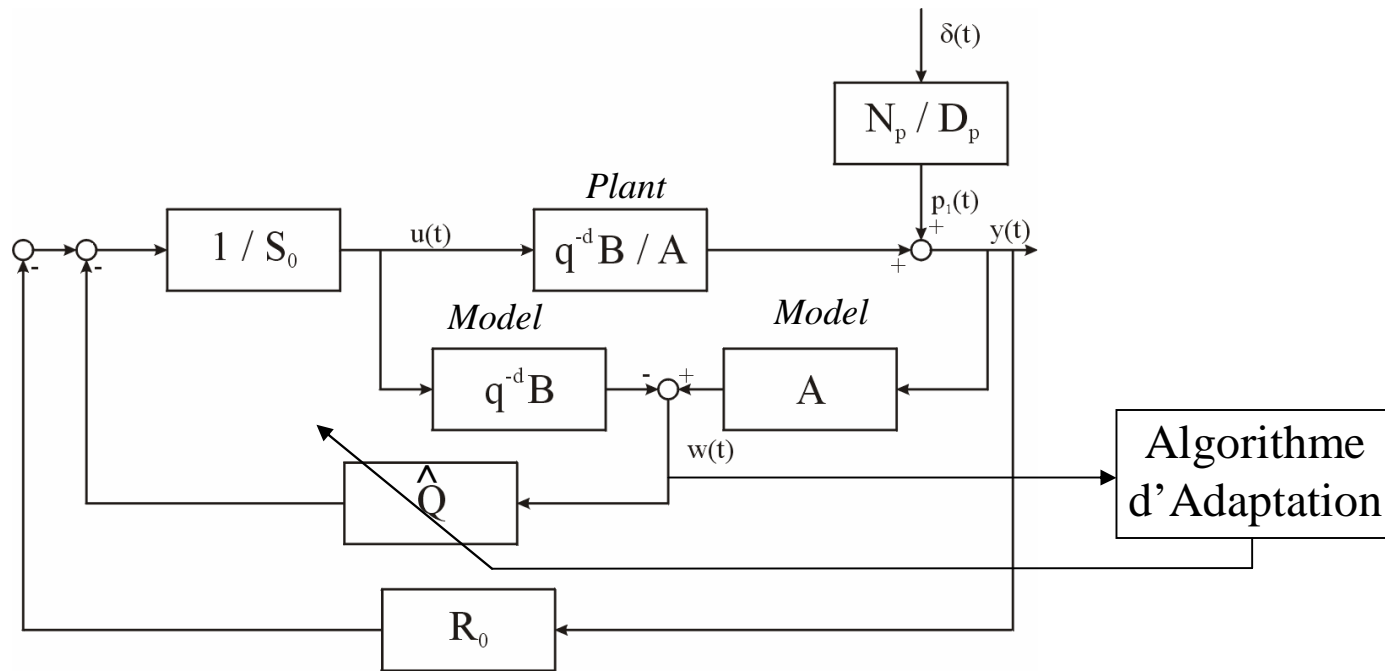
Les pôles de la boucle fermée restent inchangés!

$$\begin{aligned} Model &= Plant \\ w &= Ap_1 \end{aligned}$$

Permet un rejet complet de la perturbation (IMP)

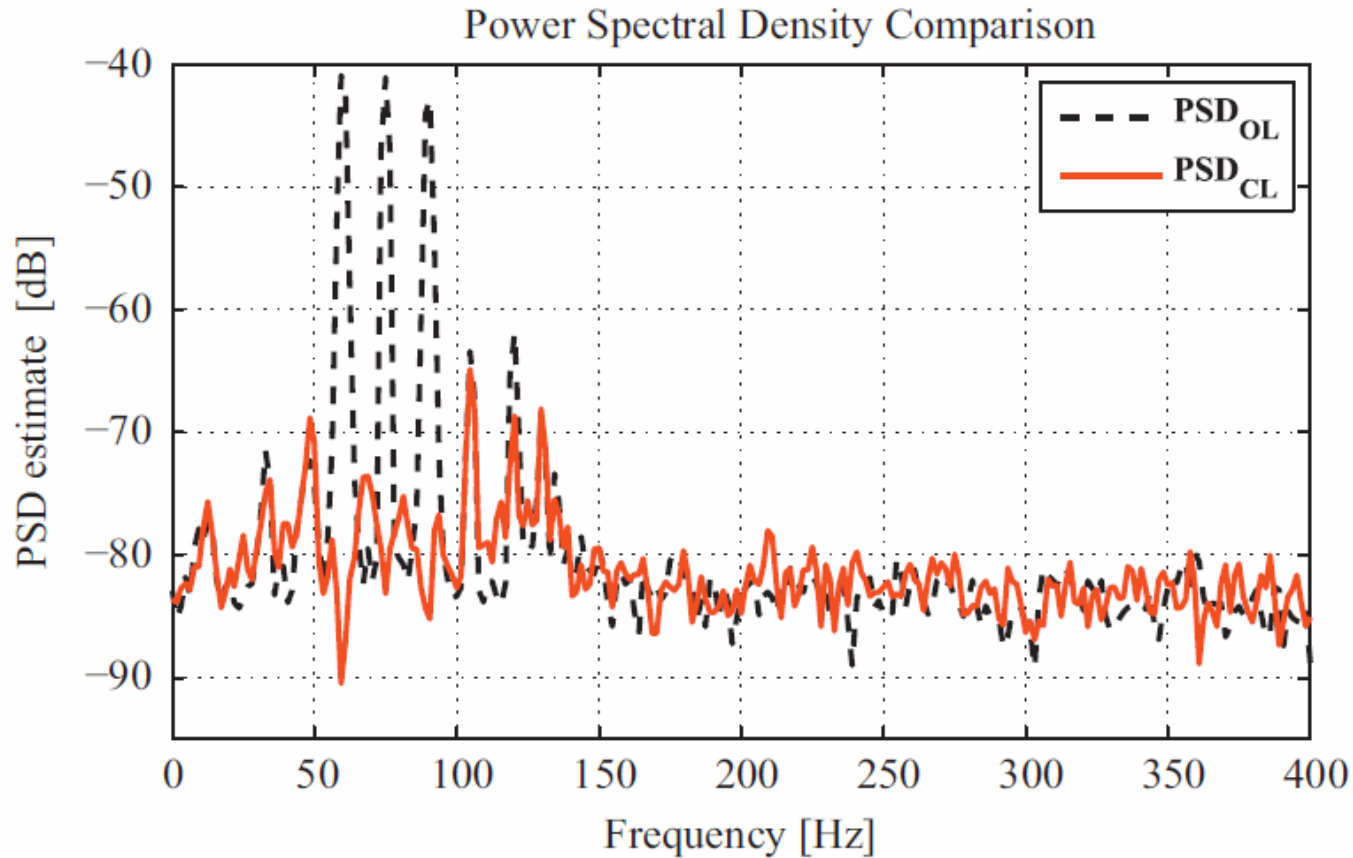


# Atténuation adaptative *directe* des perturbations “bande étroite”



- *L'ordre du polynôme  $Q$  dépend du dénominateur ( $D_p$ ) du modèle de la perturbation et non pas de la complexité du compensateur*
- *Temps de calcul sensiblement plus réduit que pour la régulation adaptative indirecte*
- *Opération en mode “auto-ajustable” mode (perturbation constante inconnue) ou en mode “adaptatif” (perturbation inconnue et variable)*

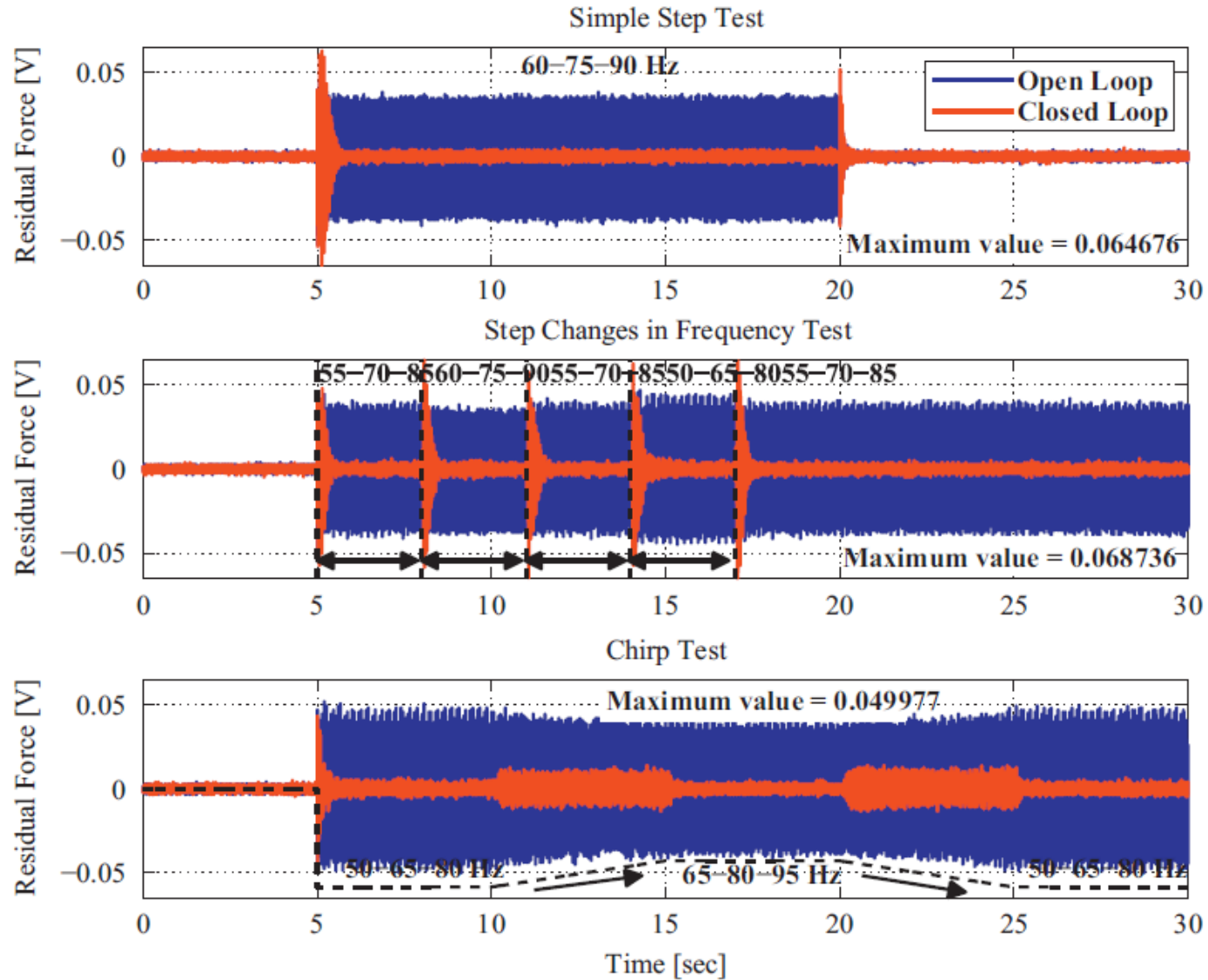
# Atténuation adaptative de perturbations “bande étroite”



OL = Boucle ouverte (pas de compensation)

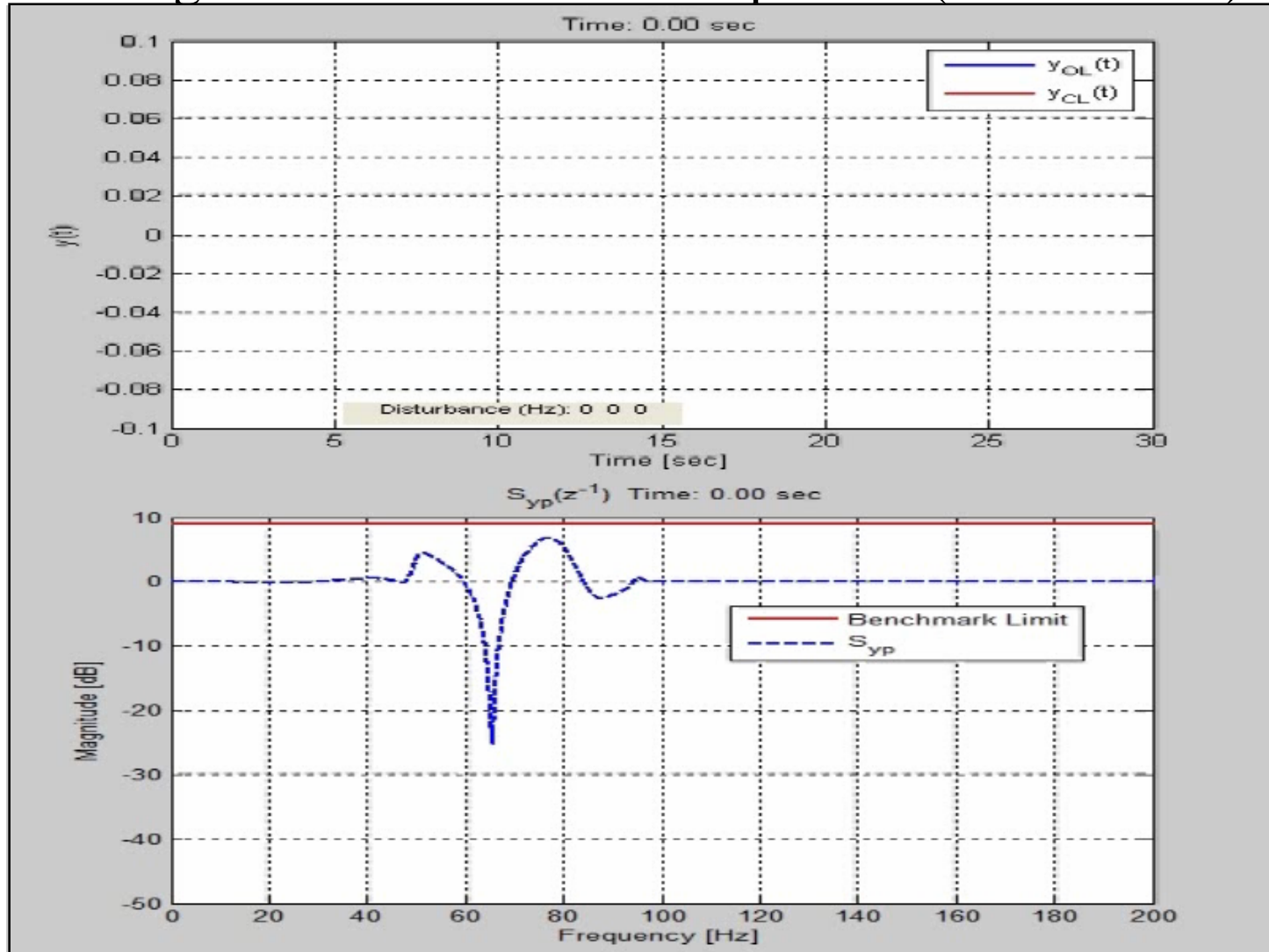
CL = Compensation adaptative en boucle fermée

# Atténuation adaptative de perturbations "bande étroite"



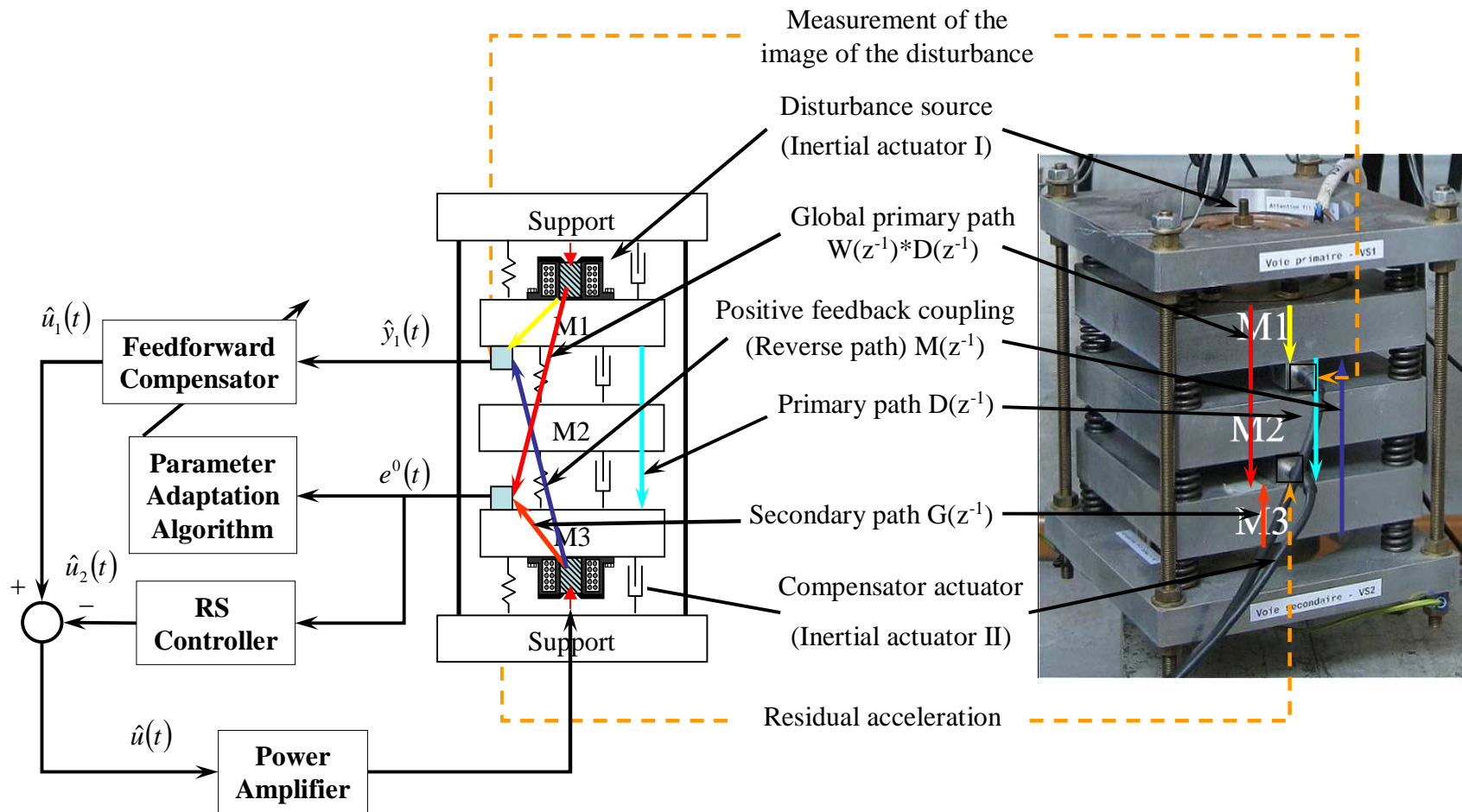
# Evolution : Force résiduelle et Fonction de sensibilité de sortie

Changement "échelon" de fréquences (3 sinusoides)



**Atténuation de Perturbations “Bande Large”  
par Précompensation Adaptative et Contre-réaction.**

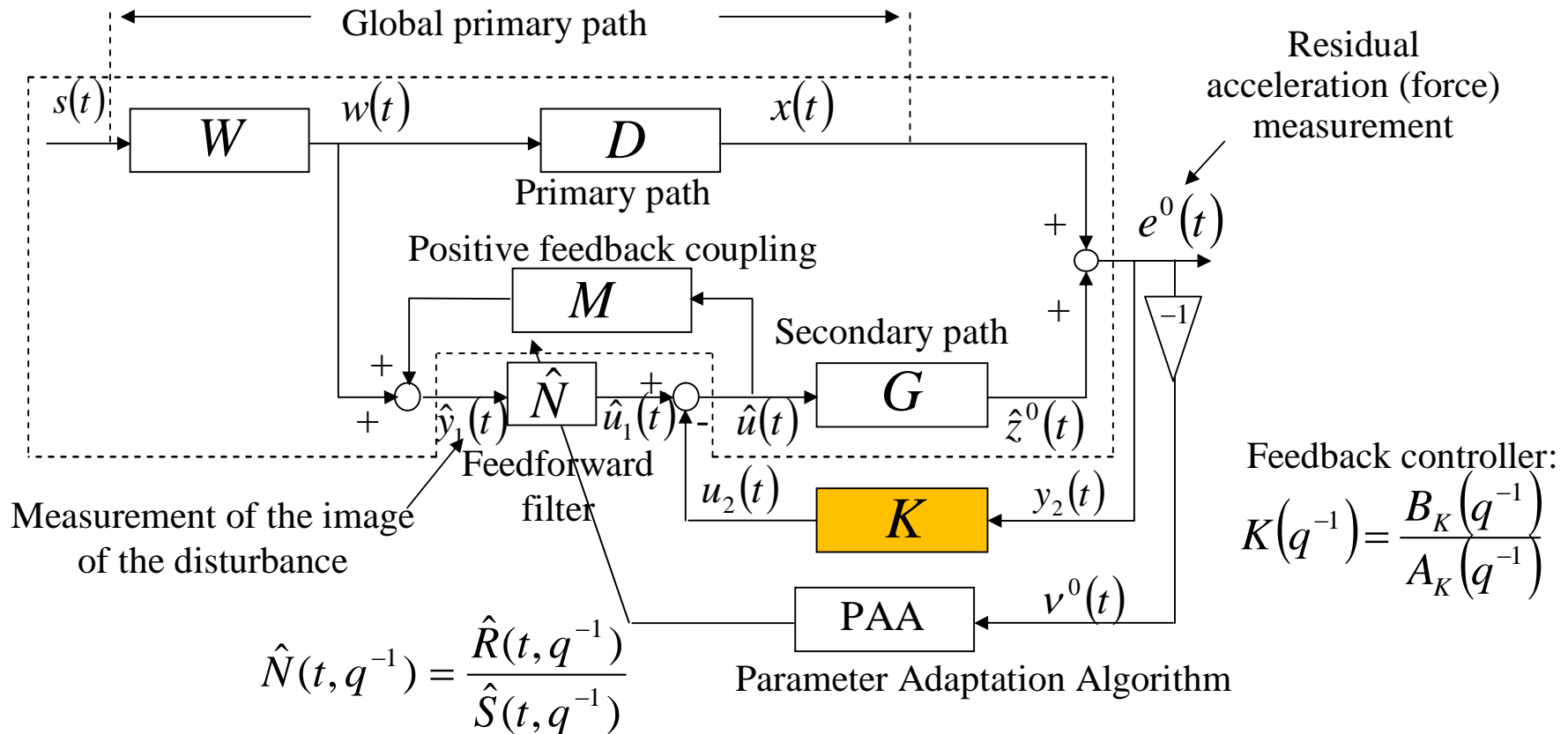
# Systeme de controle actif des vibrations avec contre-reaction et precompensation



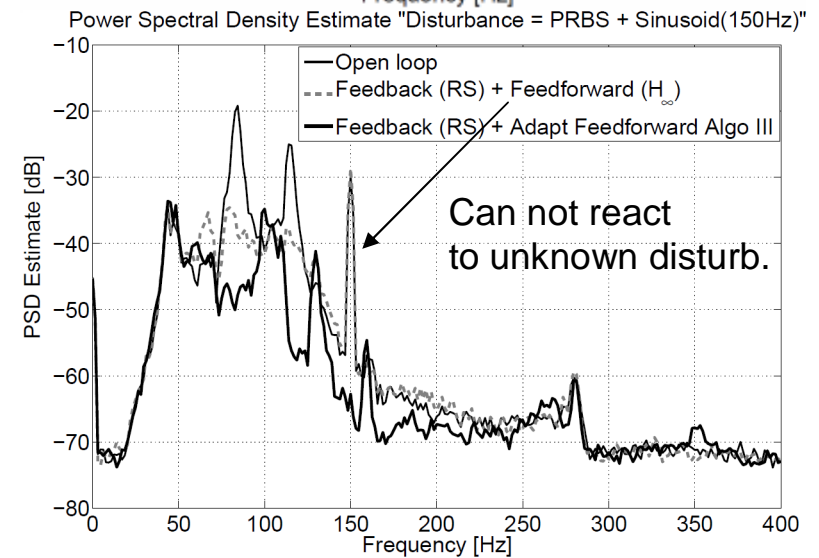
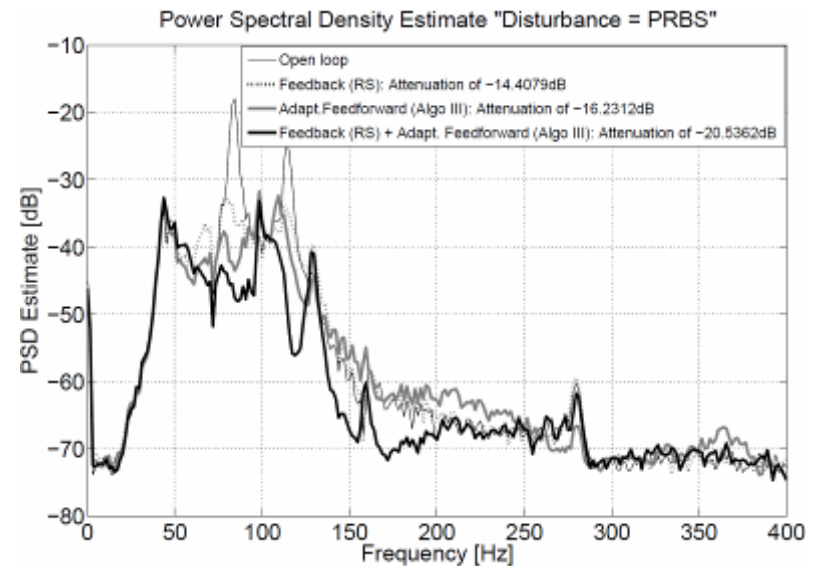
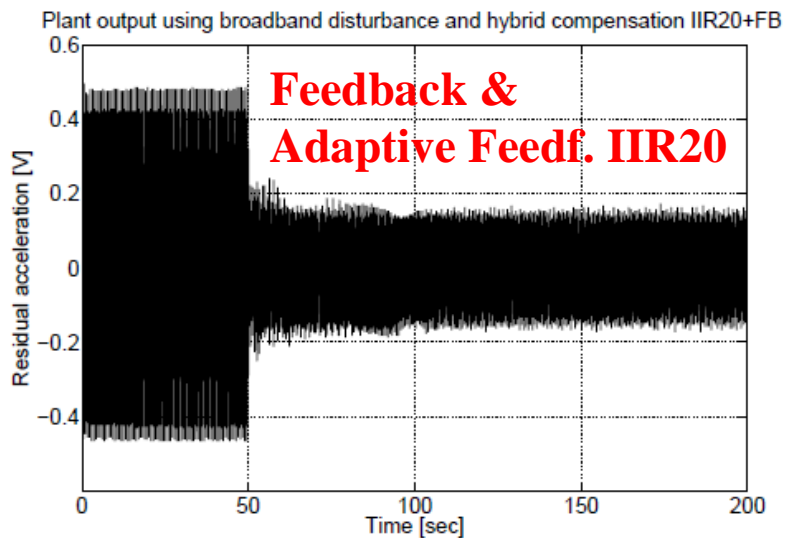
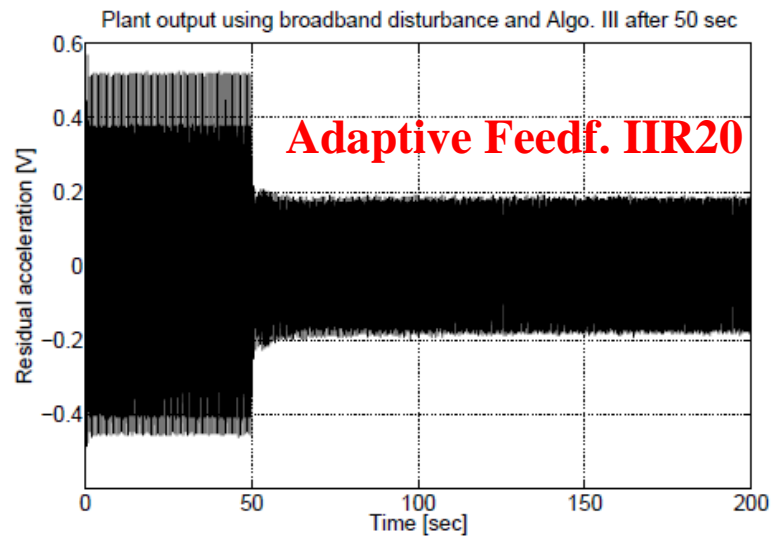


# Précompensation adaptative IIR + contre-réaction

Le précompensateur doit **minimiser** l'effet de la perturbation et assurer simultanément la **stabilité** de la boucle interne (à retour positif)



# Résultats expérimentaux : domaines temporel et fréquentiel



Wide band disturbance + sinusoid 150 Hz

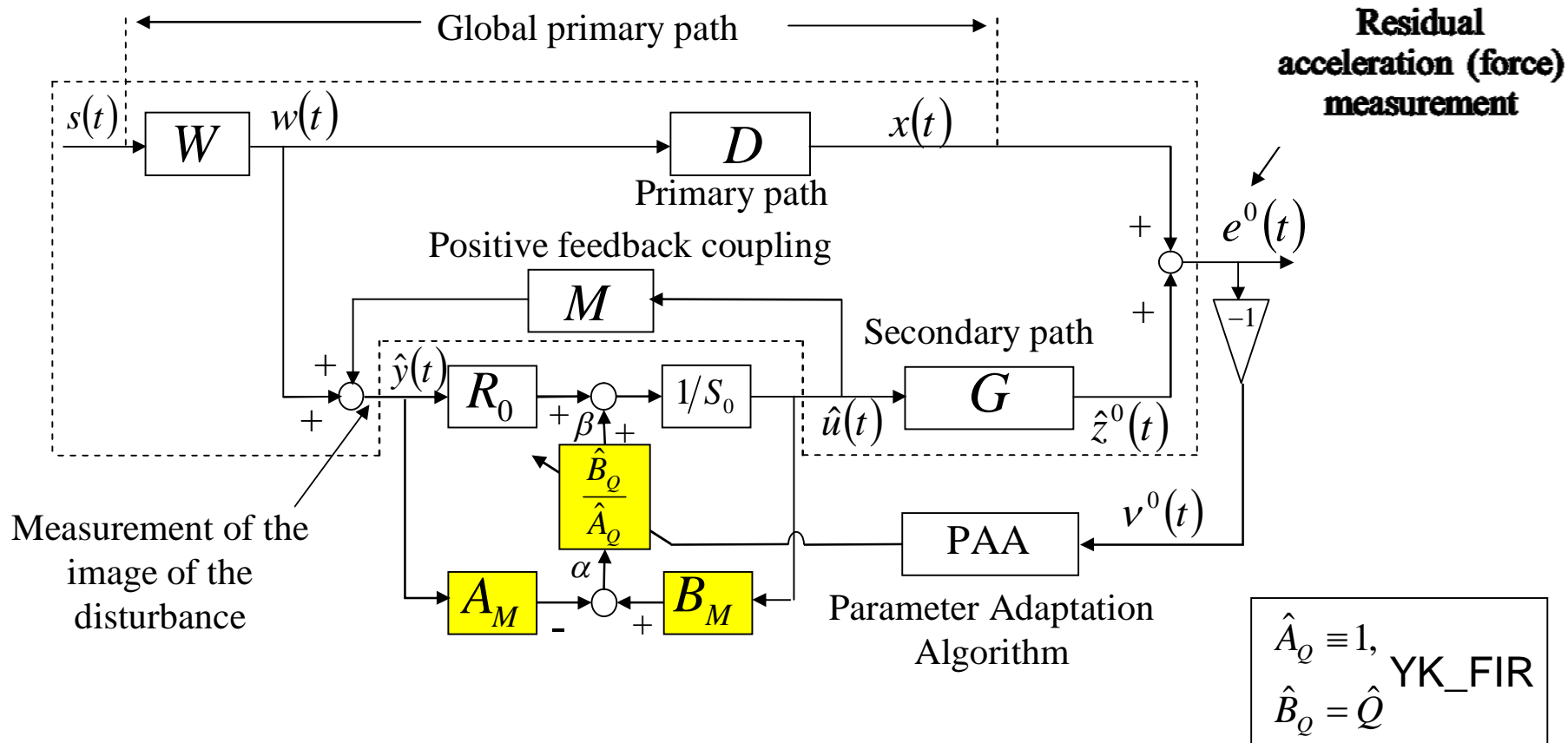
## Paramétrisation Y-K pour la Précompensation Adaptative

Le précompensateur doit **minimiser** l'effet de la perturbation et assurer simultanément la **stabilité** de la boucle interne (à retour positif)

En utilisant la paramétrisation Youla-Kucera:

- On calcule un régulateur **stabilisant** fixe pour la boucle interne (dépend seulement des paramètres du modèle du système)
- On utilise un filtre adaptatif type Y-K (Q) pour **optimiser** les performances d'atténuation

# Précompensation avec Filtre IIR + Filtre YK\_IIR adaptatif



- Performances similaires avec le précompensateur IIR adaptatif
- Moins de paramètres à adapter

# L'Algorithme d'Adaptation Paramétrique

Le précompensation adaptative et la contre-réaction adaptative utilisent le même type d'algorithme d'adaptation paramétrique.

## Idée de base:

L'erreur résiduelle (accélération, force) peut s'exprimer sous la forme:

$$e(t+1) = H(q^{-1}) [\theta - \hat{\theta}(t)]^T \Phi(t)$$

Diagram illustrating the equation  $e(t+1) = H(q^{-1}) [\theta - \hat{\theta}(t)]^T \Phi(t)$  with labels:

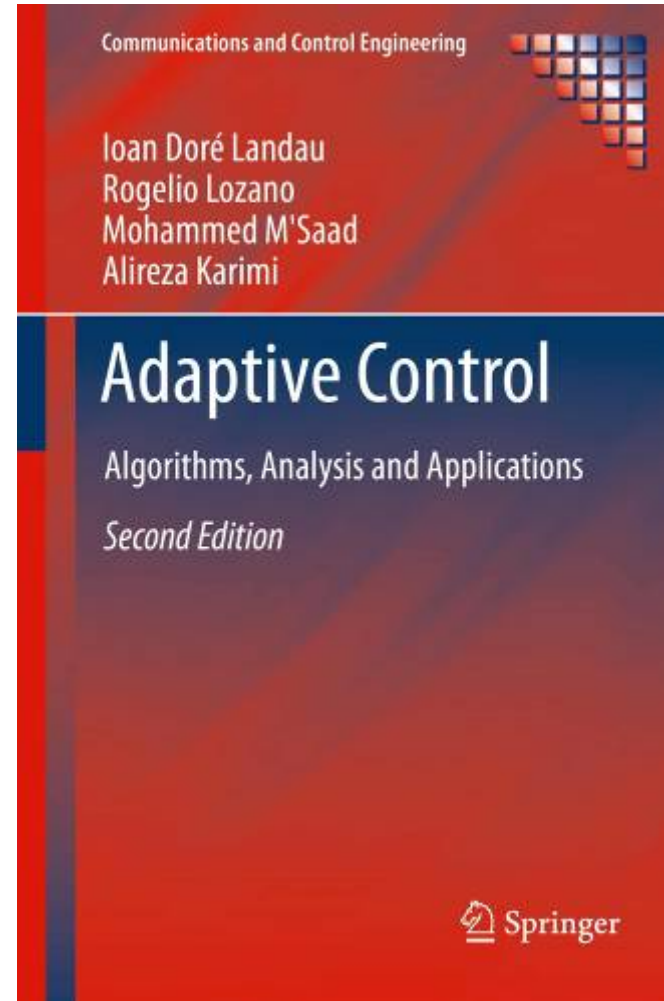
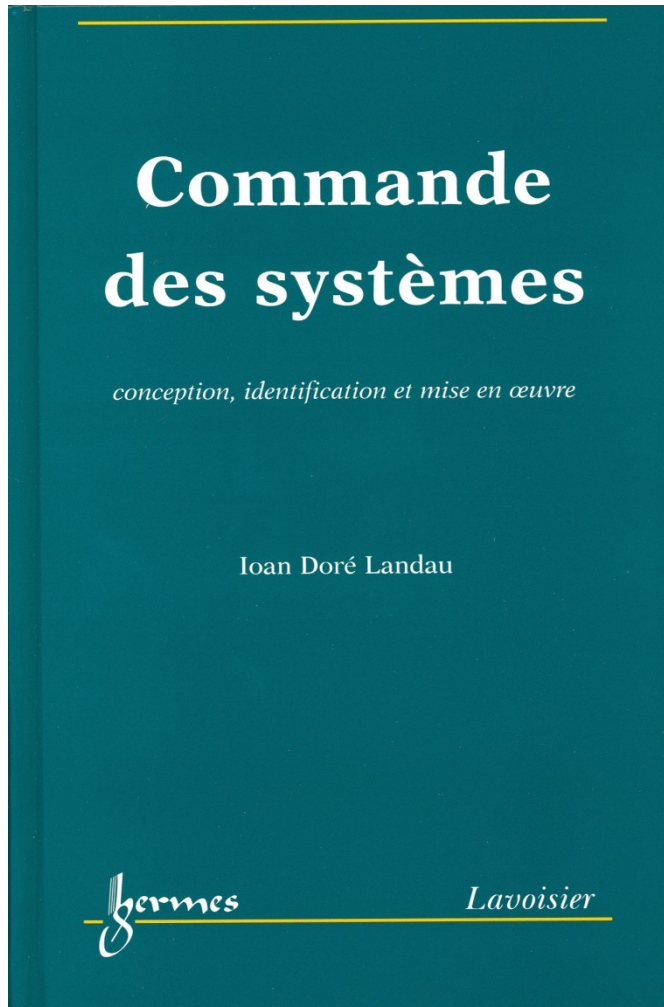
- Erreur résiduelle**: points to  $e(t+1)$
- Opérateur de transfert**: points to  $H(q^{-1})$
- Paramètres inconnus du filtre optimal (vecteur)**: points to  $\theta$
- Paramètres estimés du filtre (vecteur)**: points to  $\hat{\theta}(t)$
- Vecteur des observations (mesures filtrées)**: points to  $\Phi(t)$

## Algorithme d'Adaptation Paramétrique:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t+1)\Phi(t)e(t+1)$$

*Pour les détails, voir les livres indiqués dans le transparent suivant.*

## References



<http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/~ioandore.landau/identificationandcontrol/>

ISBN:978-0-85729-663-4

<http://www.landau-adaptivecontrol.org/>

## Quelques Remarques

- L'Automatique apporte une perspective constructive pour le contrôle actif de vibrations
- Les problèmes d'automatique associés aux systèmes de contrôle actif de vibrations ont été bien compris
- Des solutions ont été proposées et testées expérimentalement
- Les concepts fondamentaux pour la compréhension, la conception et l'analyse des systèmes de contrôle actif de vibrations sont :
  - *Les Fonctions de Sensibilité (pour la performance et la robustesse)*
  - *L'Intégrale de Bode*
  - *Le Principe du Modèle Interne*
  - *La Paramétrisation Youla –Kucera*
  - *Les Algorithmes d'Adaptation Paramétrique*
  - *L'Analyse de Stabilité*
  - *Les techniques d'Identification de Modèle Dynamiques*

# Transparents Additionnels



## Robustness design considerations

- Assuming that the model of the disturbance is known
- That one uses “internal model principle”

For *all possible* parameters values of the disturbance model, the resulting controller should be *robust*.

(acceptable: modulus margin, delay margin, maximum value of  $|S_{up}|$ )

At the frequencies where perfect rejection occurs ( $S_{yp}=0$ ) one has:

$$|S_{up}(e^{-j\omega})| = \left| \frac{A(e^{-j\omega})}{B(e^{-j\omega})} \right| \quad (\text{inverse of the plant gain})$$

Robustness require small values of  $|S_{up}|$  !

### Consequence:

Perfect rejection of disturbances can be done only in the frequency range where the plant (secondary path) has enough gain.

## Summary of experimental results

Disturbance: broad band disturbance

### Global attenuation

	Feedback only	Feedforward only ( $H_{inf}$ )	Adaptive Feedforward only	Feedback & Adaptive Feedforward	Feedforward ( $H_{inf}$ ) & Feedback
Attenuation	-14.40 dB	-14.70 dB	-16.23 dB	-20.53 dB	-18.42 dB

Feedback controller:  $nB_K=16$ ,  $nA_K=18$  (Pole placement with sensitivity functions shaping)

Adaptive IIR feedforward compensator: 20 adjustable parameters ( $n_R=10$ ,  $n_S=9$ )

#### Attention:

The design of the **fixed  $H_{inf}$  feedforward compensator** (last column) requires the **knowledge of the disturbance characteristics** (unknown and time varying in practice) and of the **model of the primary path** (not required by the adaptive algorithms)