



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/10368>

#### **To cite this version :**

Marc REBILLAT - Contrôle santé des structures basé sur la signature dynamique non-linéaire de dommages - 2015

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)





# Contrôle santé des structures basé sur la signature dynamique non-linéaire de dommages

**Marc REBILLAT**

**Nazih MECHBAL**

**Rafik HAJRYA**

**Myriam BAKIR**

*DYSCO Group, PIMM, Arts et Métiers ParisTech, Paris, France*

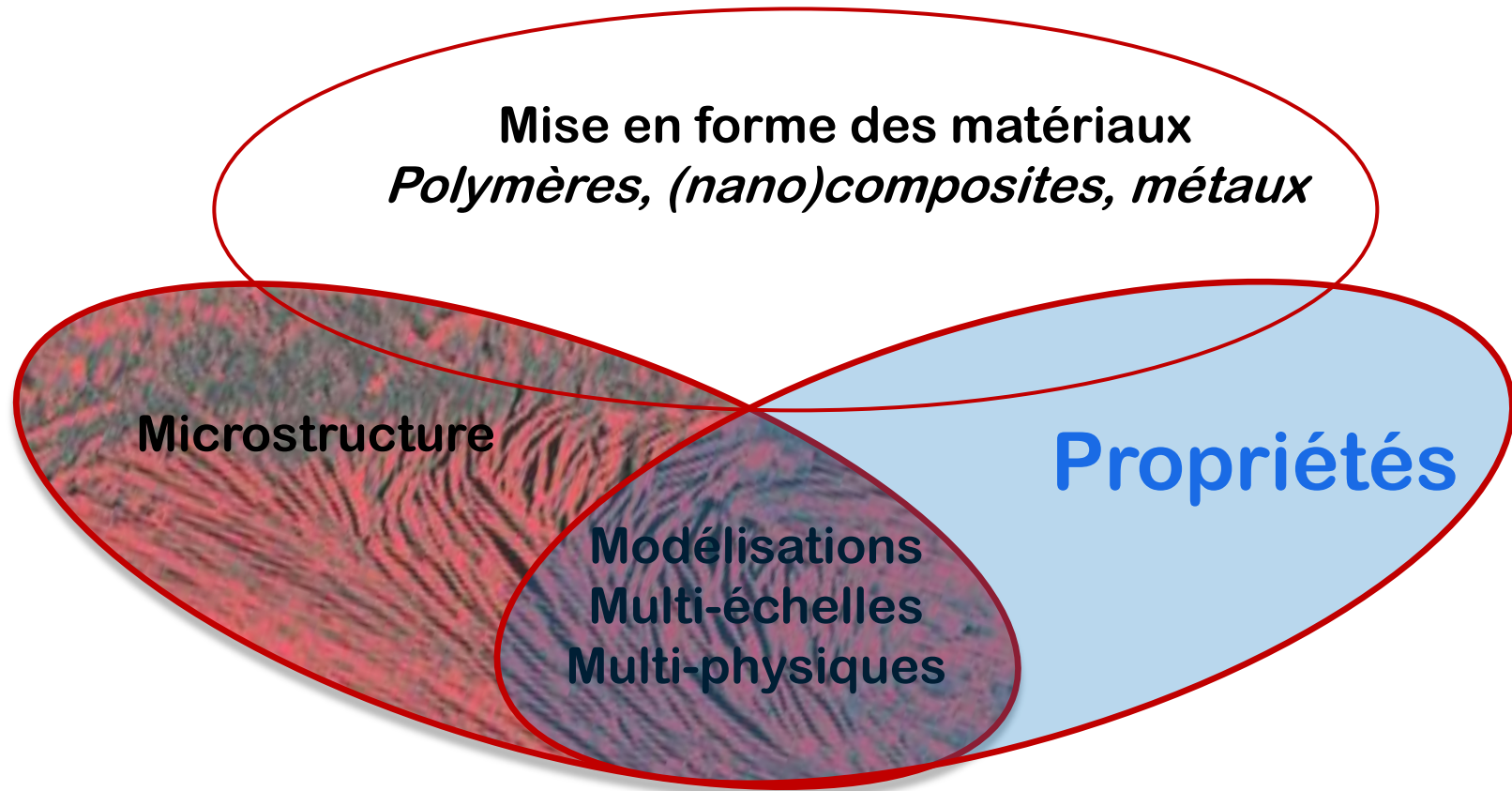
**Clément B. BARTHES**

**Khalid M. MOSALAM**

*PEER, University of California Berkeley, CA, USA*

# Introduction

## Le laboratoire PIMM



- Environ 50 permanents, 40 doctorants et 10 post-doctorants
- ***“Du matériau aux structures intelligentes”***

# Introduction

## Contexte applicatif

### □ Sans compromettre la sécurité, peut on réaliser des structures:

- Plus légères?
- Moins chères?
- Plus sûres?
- Plus facile à maintenir?

### □ Domaines d'application:

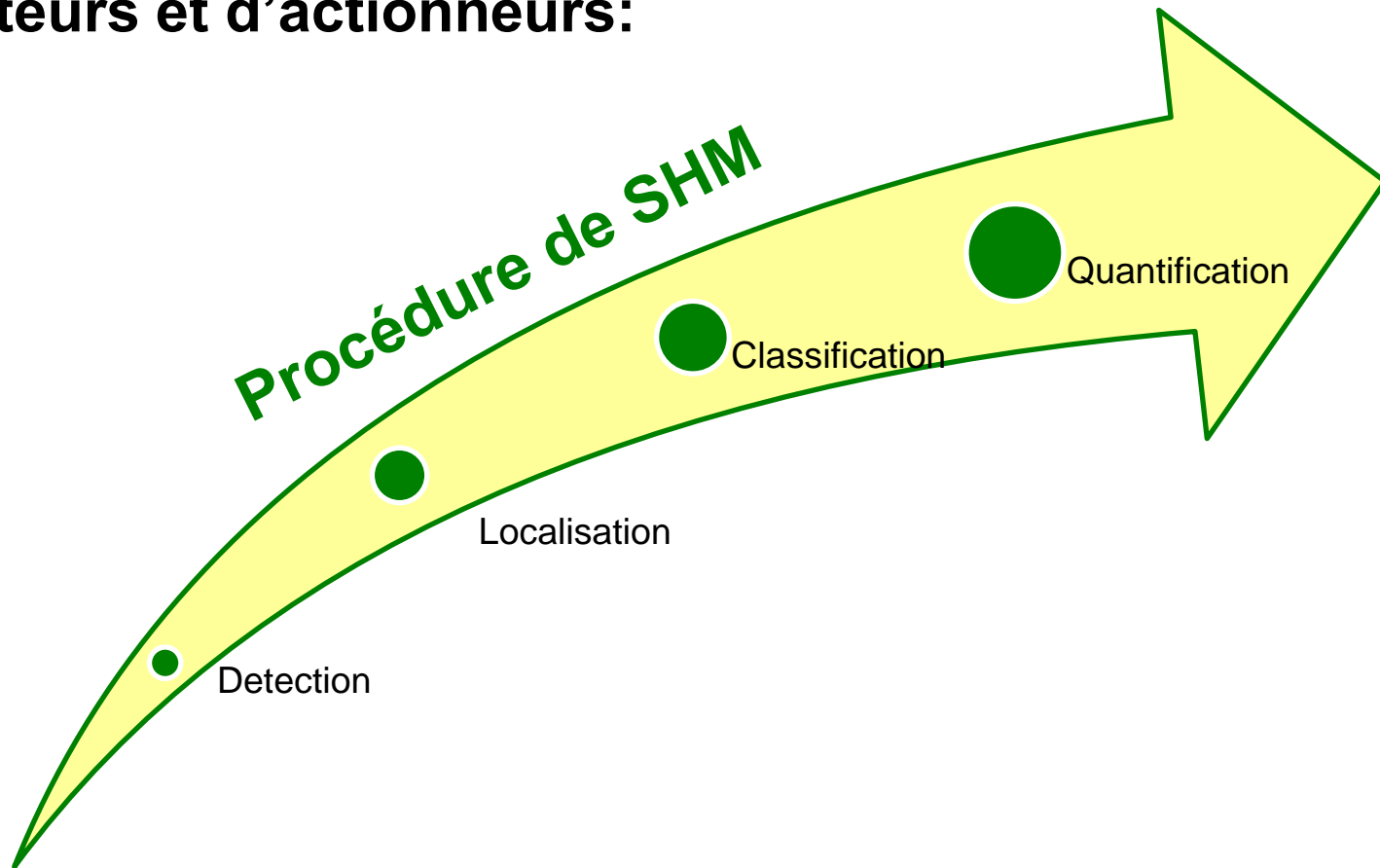
- Aéronautique
- Génie civil



# Introduction

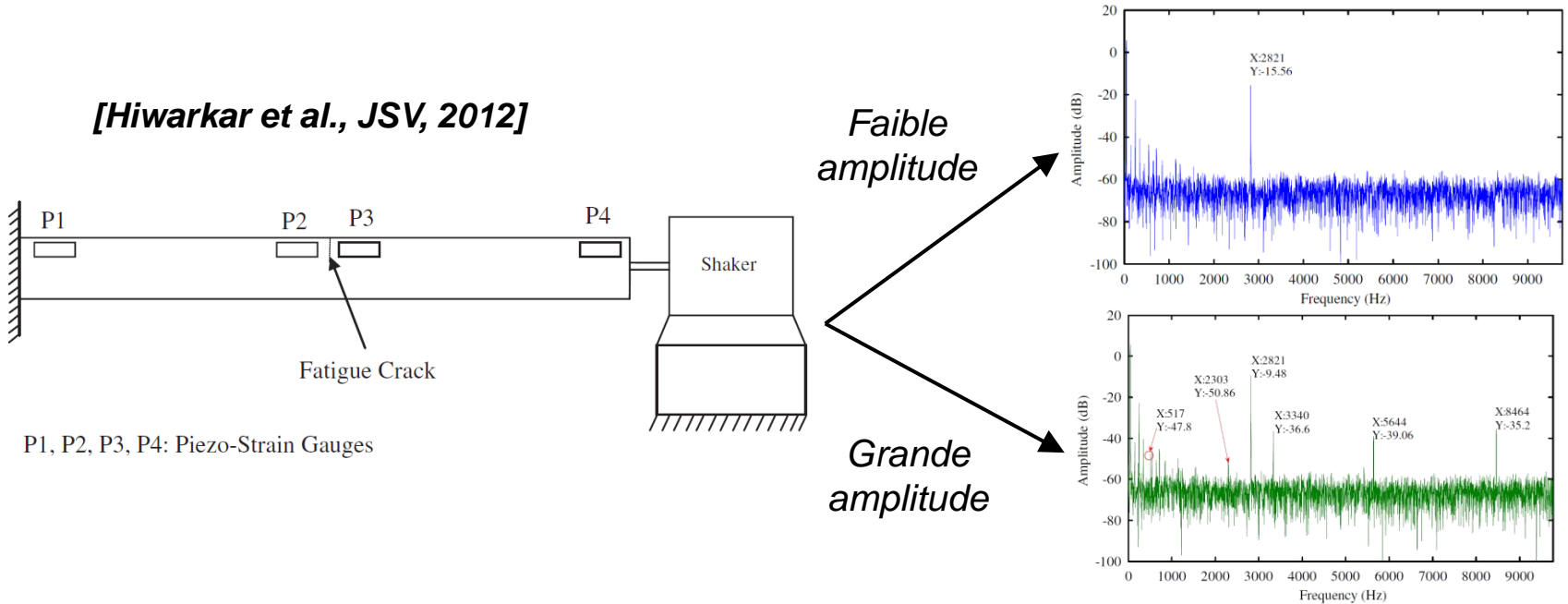
## Le contrôle de la santé des structures (SHM) [Worden, 2007]

- Si il est possible d'équiper la structure à surveiller de capteurs et d'actionneurs:



# Introduction

## SHM à partir des nonlinéarités générées par les dommages



❑ Les dommages induisent des **nonlinearités** dans la réponse des structures.

➤ **Comment les utiliser à des fins de SHM?**

## SHM à partir des nonlinéarités générées par les dommages

### □ Un problème qui éveille l'intérêt:

- Farrar et al. *“Nonlinear System identification for damage detection”* (2007)
- Worden et al. *“A review of nonlinear dynamics applications to structural health monitoring”* (2008)

### □ Mais... [Farrar,2007]

- “Nonlinear **behavior does not generalize.**”
- “Nonlinear approaches are **computationally cumbersome**, expensive and requires **many parameters** to be defined.”

### □ Existe t'il **un modèle nonlinéaire “général”** pouvant être **facilement estimé** et permettant de construire des **indices d'endommagement efficaces**?

### **I) Les modèles de Hammerstein en parallèle**

- a) Qu'est-ce que c'est?**
- b) Comment les estimer?**

### **II) Application au contrôle santé des structures**

- a) Détection de dommages dans des matériaux composites**
- b) Quantification de dommages en génie civil**
- c) Vers la classification...**



### I) Les modèles de Hammerstein en parallèle

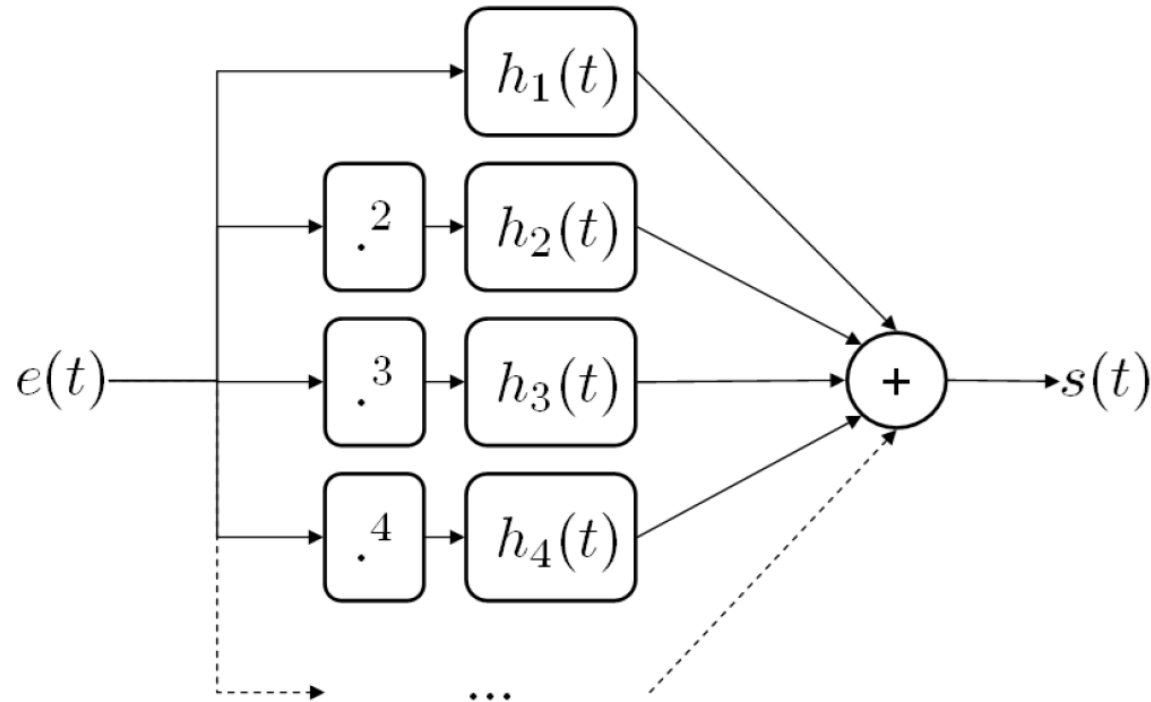
- a) Qu'est-ce que c'est?
- b) Comment les estimer?

### II) Application au contrôle santé des structures

- a) Détection de dommages dans des matériaux composites
- b) Quantification de dommages en génie civil
- c) Vers la classification...

# I) Modèle non-linéaire

## Modèles de Hammerstein en parallèle

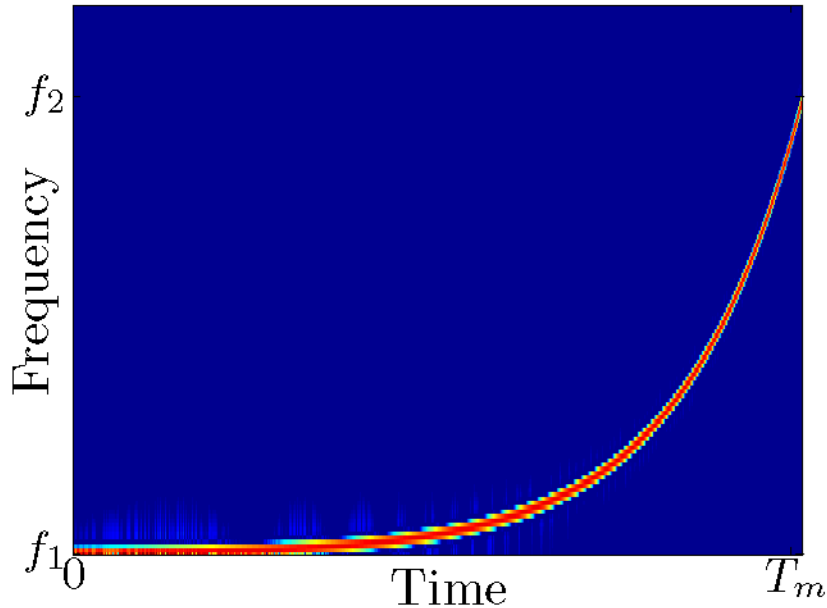


- ❑ Sous-classe des séries de Volterra: **assez général**
- ❑ Représenté par N filtres linéaires: **plutôt simple**
  - **Presque non-paramétrique** (un seul paramètre: N)

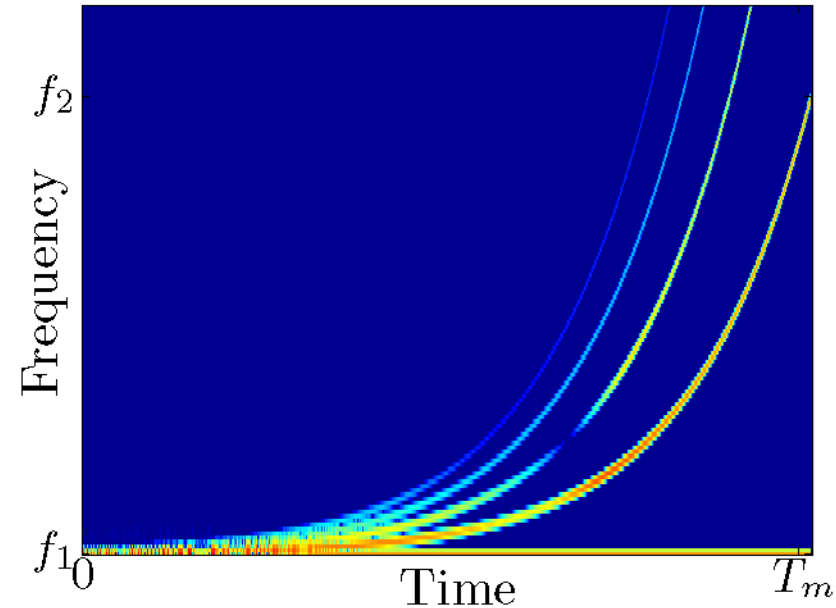
# I) Modèle non-linéaire

## Les sinus glissants exponentiels

Entrée  $e(t)$



Sortie  $s(t)$



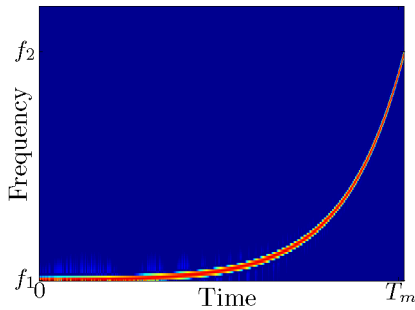
□ Pour le  $k^{\text{ième}}$  harmonique:

Si  $T_m \in \{T_1, T_2, \dots\}$  alors  $\cos[k\phi(t)] = \cos[\phi(t + \Delta t_k)]$

# I) Modèle non-linéaire

## Filtre inverse

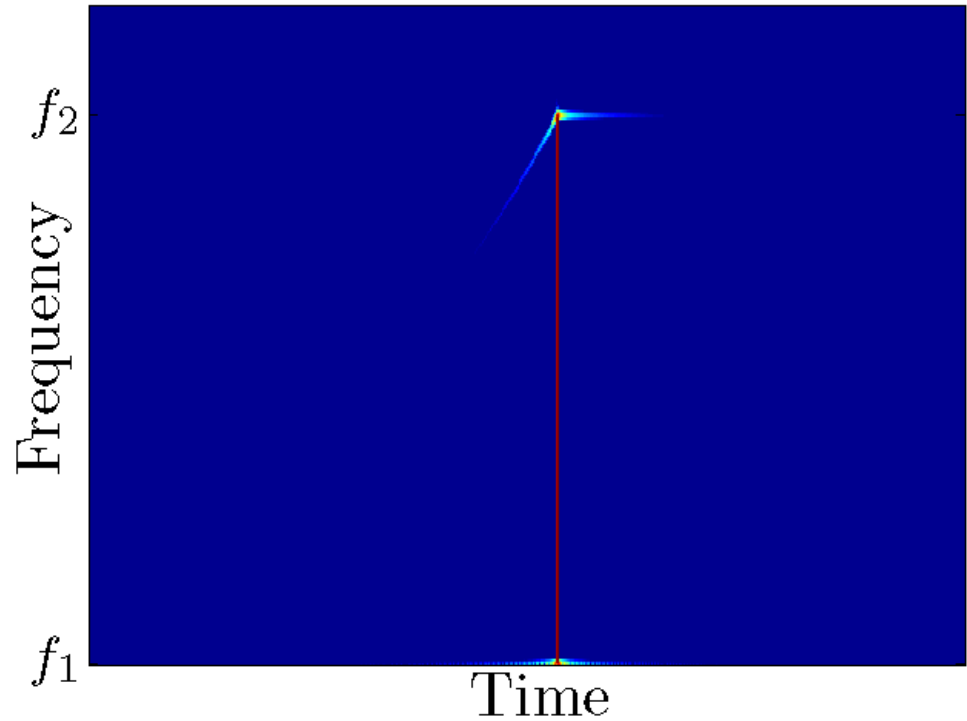
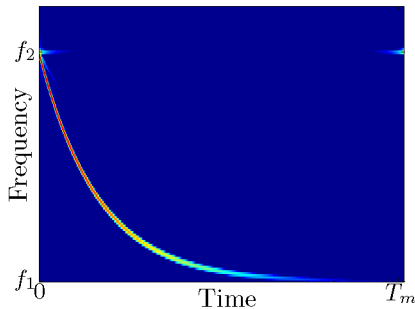
Entrée  $e(t)$



\*

=

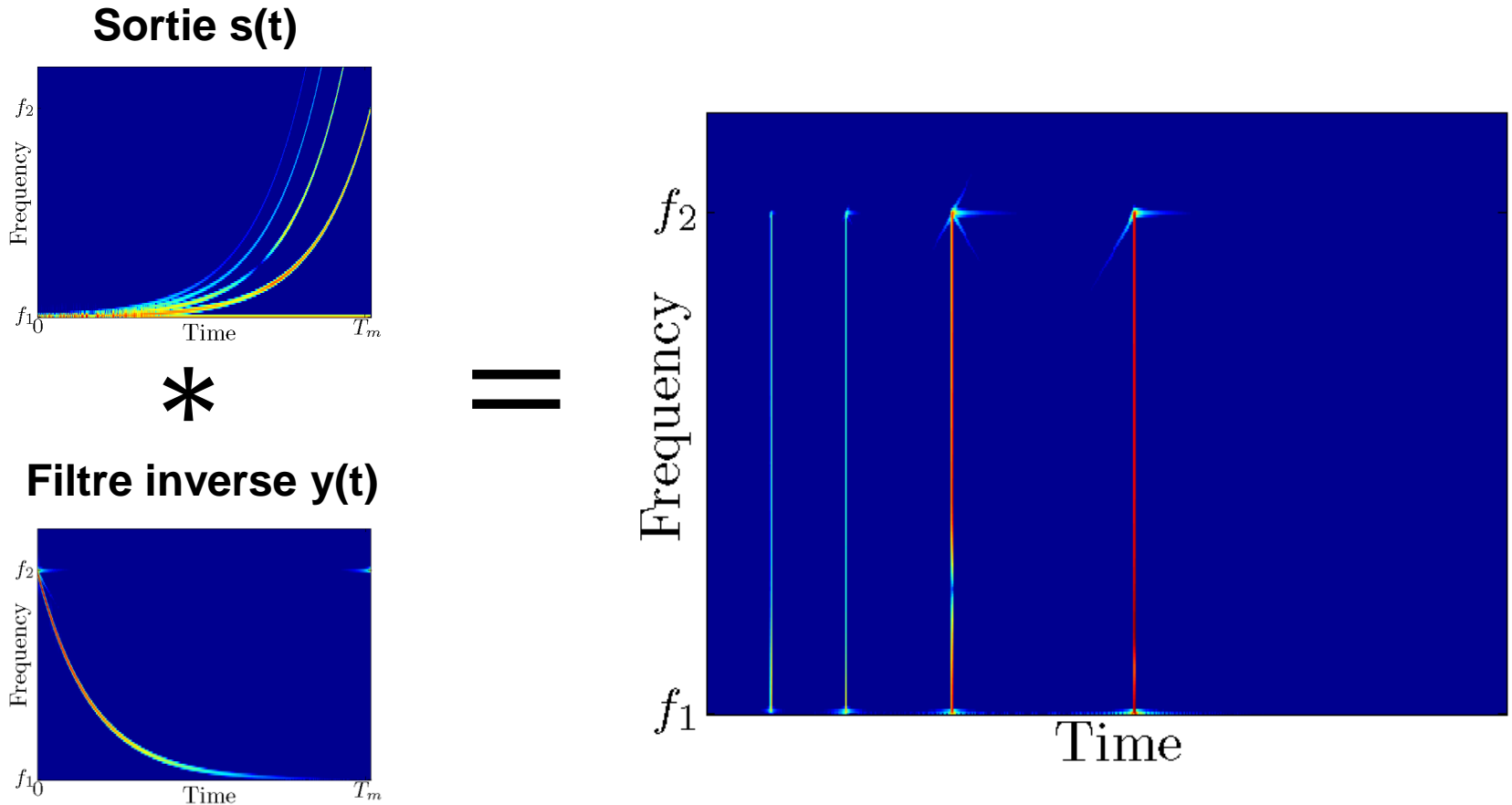
Filtre inverse  $y(t)$



**Alignement temporel** de l'énergie du fondamental

# I) Modèle non-linéaire

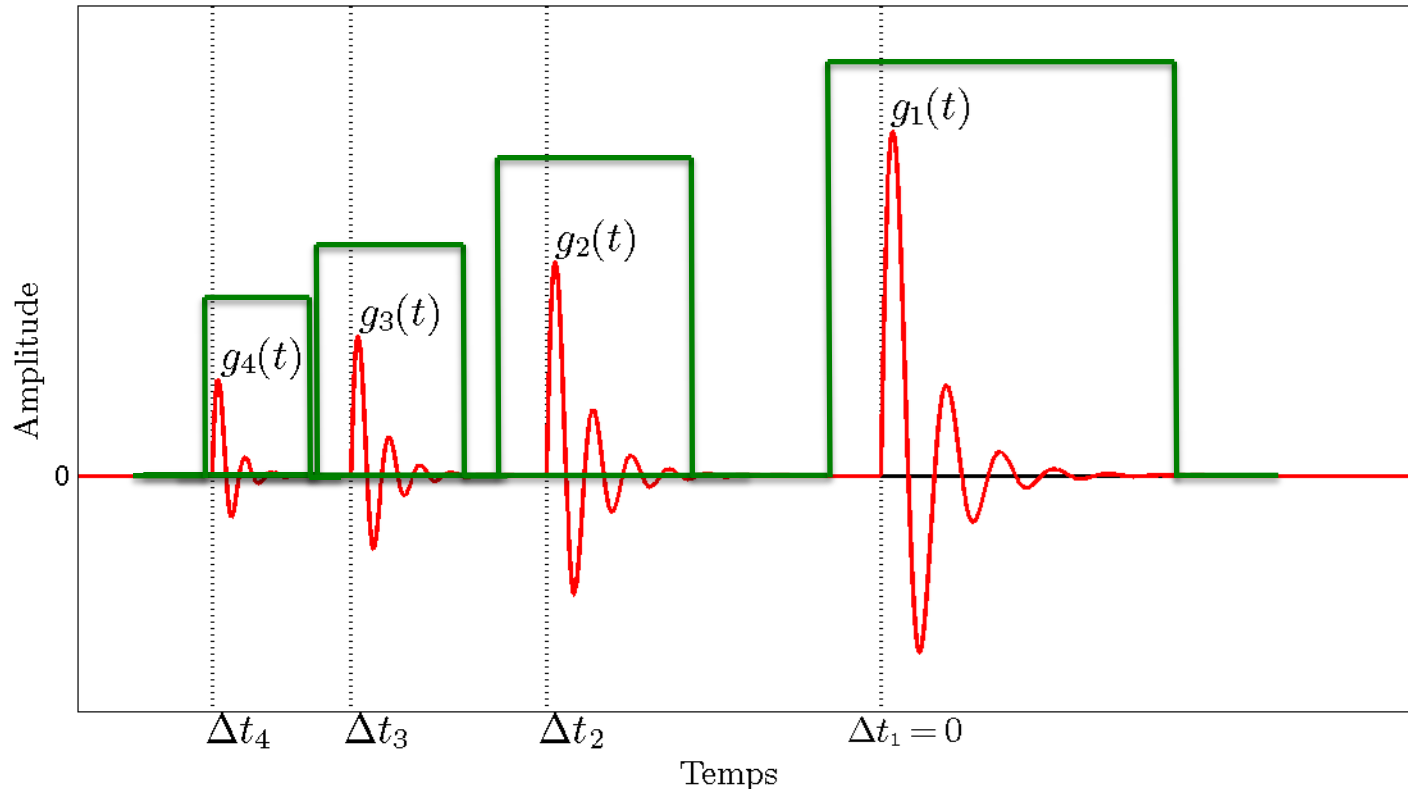
## Effet du filtre inverse sur la sortie



**□ Alignement temporel de l'énergie des harmoniques**

# I) Modèle non-linéaire

## Fenêtrage temporel



□  $g_n(t)$ : contributions des différents harmoniques

# I) Modèle non-linéaire

## Des harmoniques aux puissances...

$h_2(t)$ : contribution de la  
puissance 2

$g_2(t)$ : contribution du  
2<sup>nd</sup> harmonique

$$\cos^2(x) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2x)]$$

□ Relation linéaire entre  $h_k(t)$  et  $g_n(t)$ :

$$\begin{bmatrix} h_1(t) \\ \vdots \\ h_N(t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} g_1(t) \\ \vdots \\ g_N(t) \end{bmatrix}$$

□ **Tous les filtres  $h_k(t)$  sont estimés.**

### I) Les modèles de Hammerstein en parallèle

- a) Qu'est-ce que c'est?
- b) Comment les estimer?

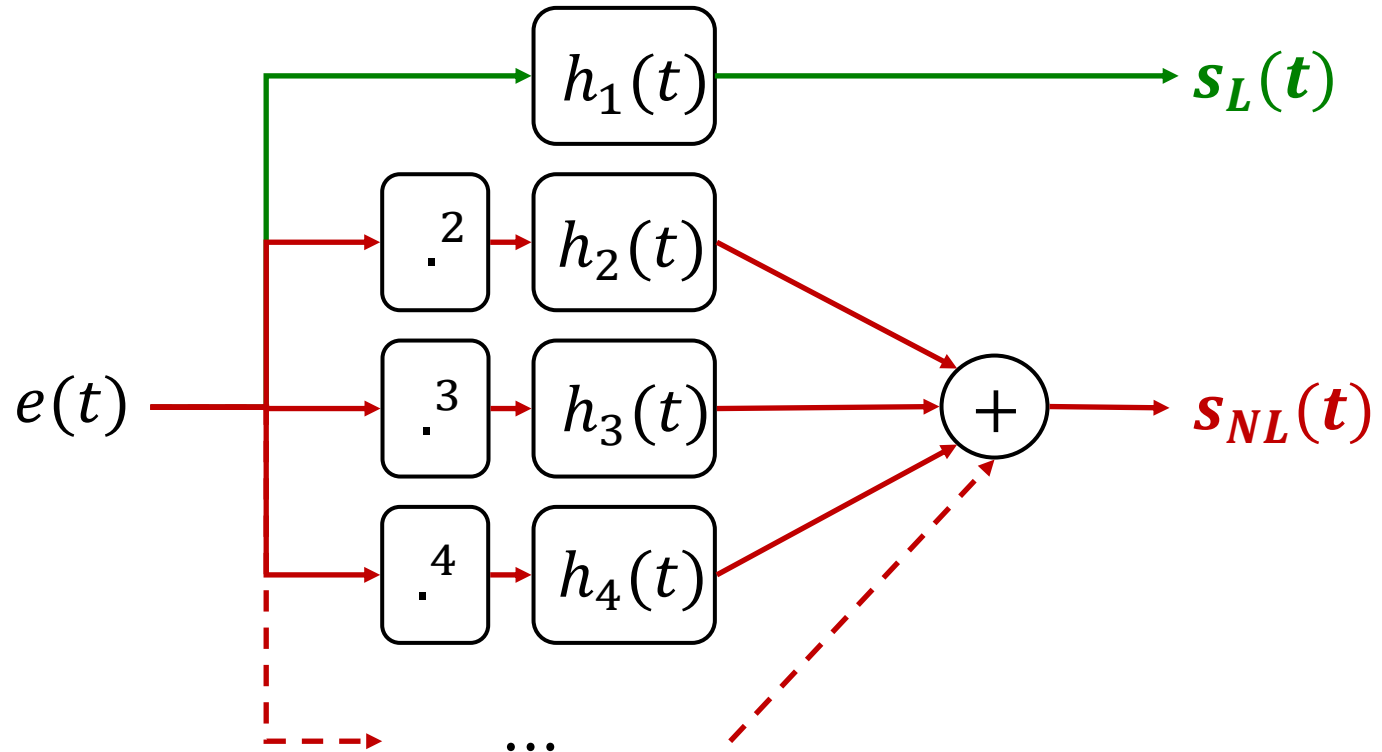
### II) Application au contrôle santé des structures

- a) **Détection de dommages dans des matériaux composites**
- b) Quantification de dommages en génie civil
- c) Vers la classification...



# II.a) Détection de dommages

## Parties linéaire et non-linéaire de la sortie



- Les parties linéaires  $s_L(t)$  et non-linéaires  $s_{NL}(t)$  sont **facilement évaluées** à partir du modèle estimé.

## II.a) Détection de dommages

### Indice d'endommagement proposé

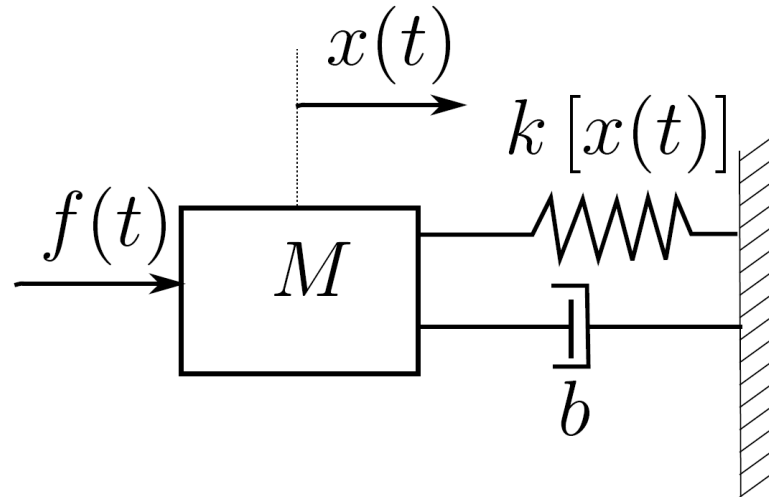
□ **Ratio** entre l'énergie dans la partie **linéaire** et la partie **non-linéaire** de la sortie.

- $S_L(f)$  est la transformée de Fourier de  $s_L(t)$
- $S_{NL}(f)$  est la transformée de Fourier de  $s_{NL}(t)$

$$DI_1 = \frac{\int_{f_1}^{f_2} |S_{NL}(f)|^2 df}{\int_{f_1}^{f_2} |S_L(f)|^2 df}$$

# II.a) Détection de dommages

## Validation numérique sur un système simulé



### □ Système “Masse-ressort-amortisseur”

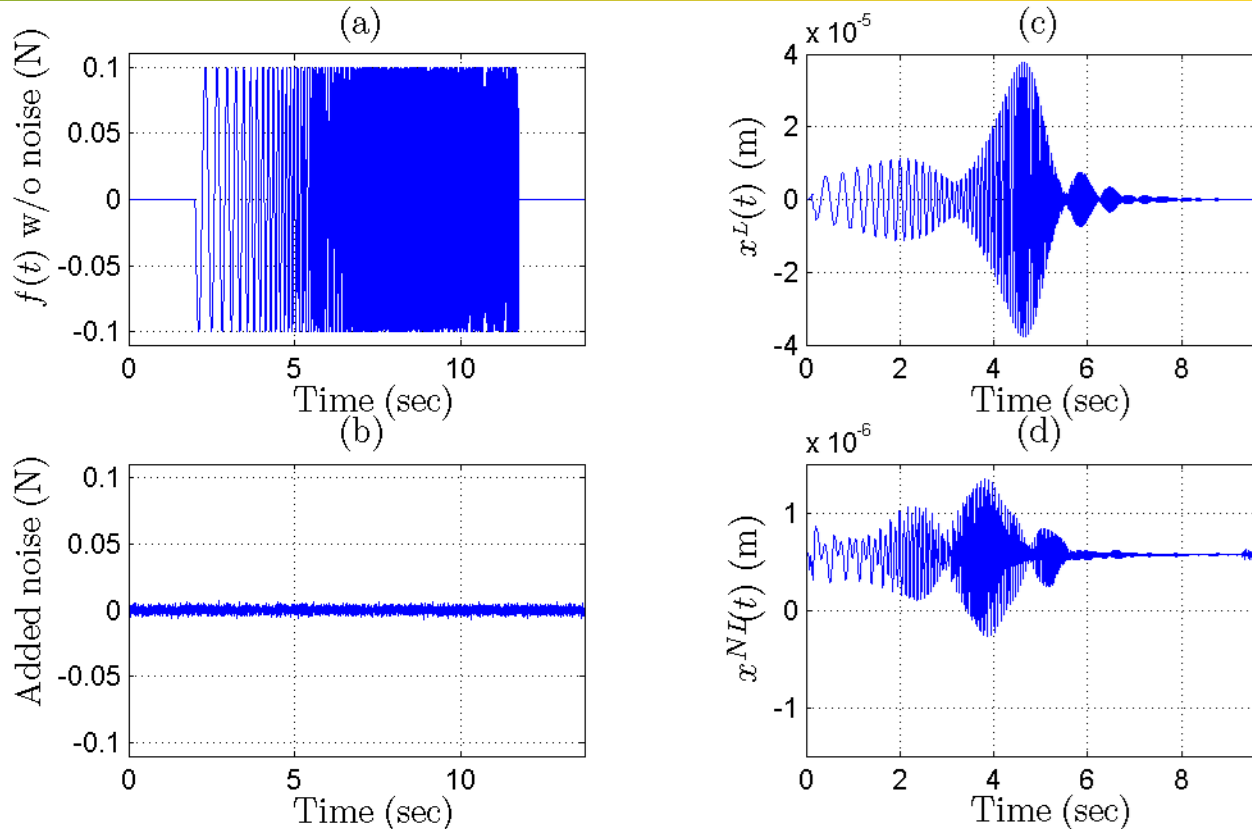
- **Dommage** simulé par une **raideur bilinéaire**

$$k[x(t)] = \begin{cases} k^I & \text{si } x(t) < 0 \\ (1 - \alpha)k^I & \text{si } x(t) > 0 \end{cases}$$

- $M = 1 \text{ kg}$ ,  $k^I = 2 \cdot 10^4 \text{ N/m}$  and  $b = 2 \text{ Ns/m}$
- Simulé via un algorithme de Runge-Kutta avec  $f_s = 563 \text{ Hz}$

# II.a) Détection de dommages

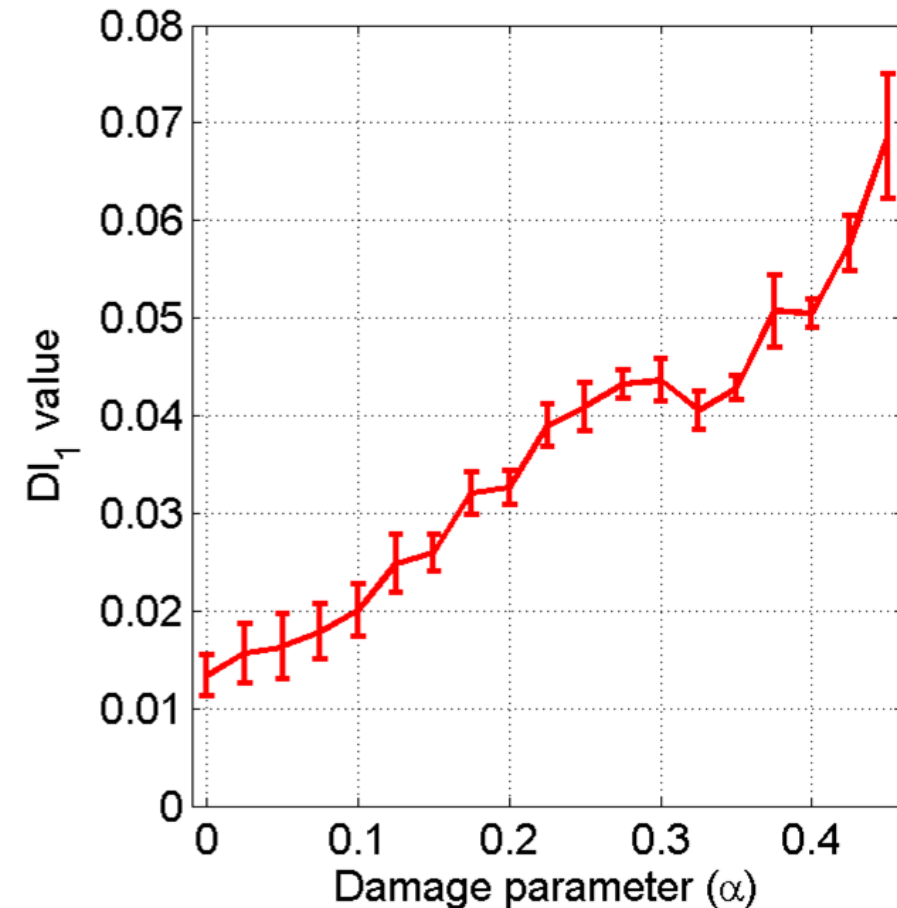
## Signaux d'entrée et de sortie



- (a) Entrée:  $[f_1 \ f_2] = [2.25 \ 225]$  Hz, amplitude 0.1 N
- (b) Bruit: SNR=30 dB
- (c) et (d): parties linéaire non-linéaire de la sortie

# II.a) Détection de dommages

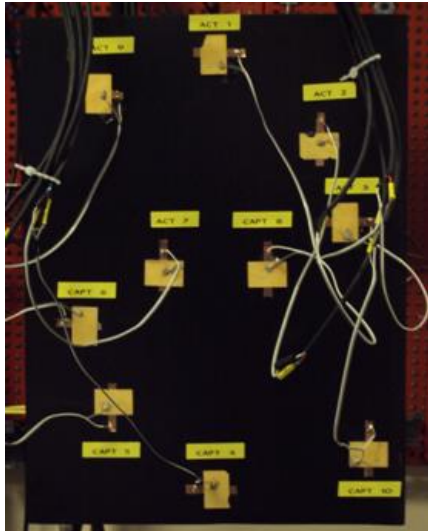
## Résultats numériques



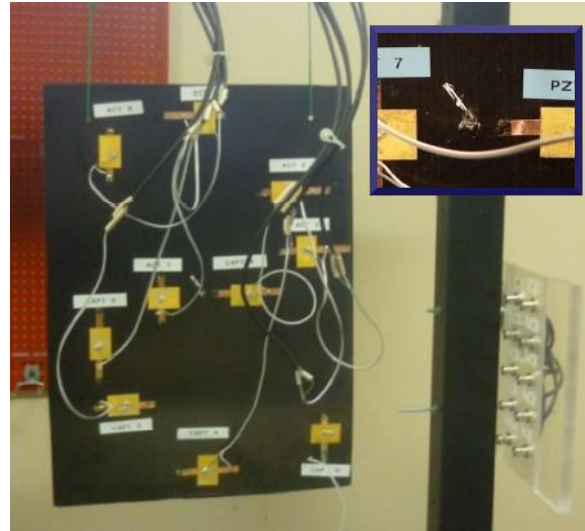
- Le **dommage** est **detecté**
- Evolution monotone** du dommage avec la sévérité
- $DI_1$  est **robuste** au bruit environnemental

# II.a) Détection de dommages

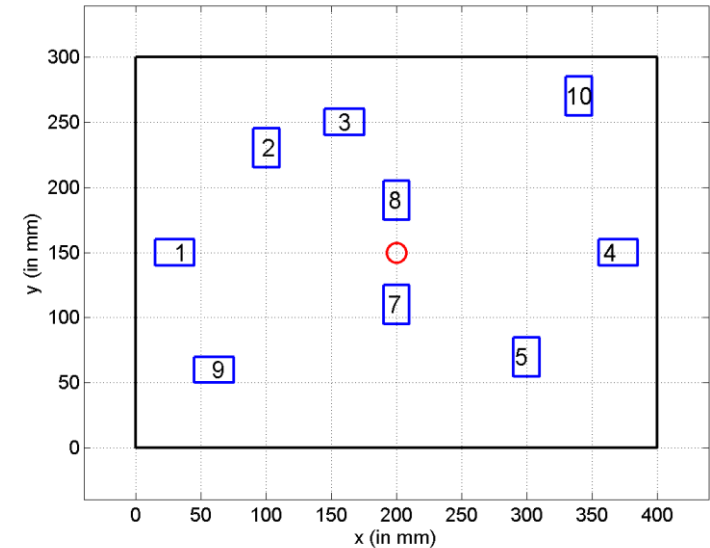
## Validation expérimentale



Plaque saine



Plaque endommagée

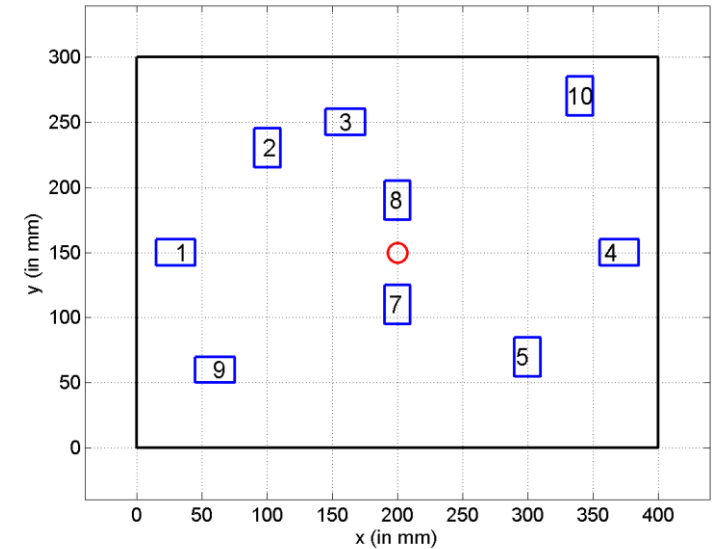
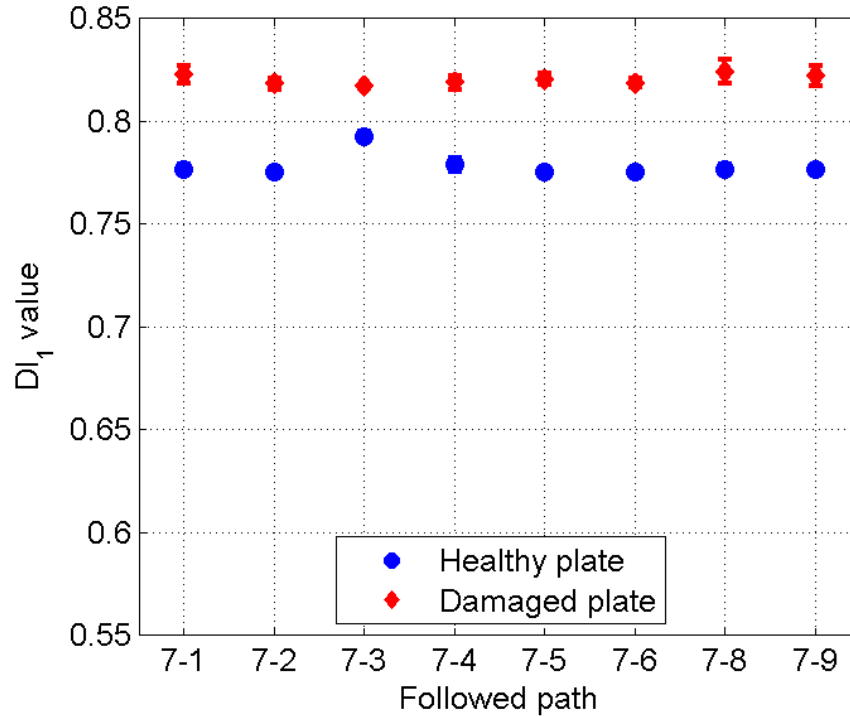


Répartition des PZTs

- Echantillon de fuselage aéronautique
- Entrée:  $[f_1 f_2] = [0.1 \ 30]$  kHz
- SNR  $\approx$  60 dB.
- Echantillonnage à  $f_s = 100$  kHz.

# II.a) Détection de dommages

## Validation expérimentale



**Overview**

**10 repetitions autour du PZT**

**7**

- Le **damage** est **detecté** sur tous les chemins
- $DI_1$  est **robuste** au bruit environnemental

### I) Les modèles de Hammerstein en parallèle

- a) Qu'est-ce que c'est?
- b) Comment les estimer?

### II) Application au contrôle santé des structures

- a) Détection de dommages dans des matériaux composites
- b) Quantification de dommages en génie civil**
- c) Vers la classification...



## II.b) Quantification de dommages

### Indices d'endommagement proposés

□ **Indice d'endommagement linéaire:**  $DI_L = \frac{f_D - f_H}{f_H}$

- Différence entre la fréquence de résonance du premier mode à l'état sain et à l'état endommagé.

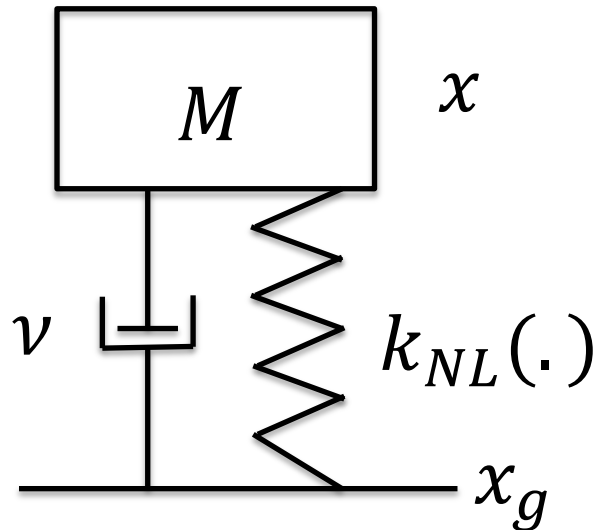
□ **Indice d'endommagement nonlinéaire:**  $DI_{NL} = \frac{R_3(f_D) - R_3(f_H)}{R_3(f_H)}$

- Différence entre les amplitudes relatives du 3ème harmonique et du fondamental autour de la résonance.

$$R_3(f) = \int_{f-\delta f}^{f+\delta f} \frac{|H_3(3\nu)|}{|H_1(\nu)|} d\nu$$

## II.b) Quantification de dommages

### Systeme simulé



- Raideur bilinéaire ( $0 < \alpha < 1$ )

$$k_{NL}(x - x_g) = \begin{cases} k & \text{si } x - x_g < 0 \\ (1 - \alpha)k & \text{sinon} \end{cases}$$

- Paramètres

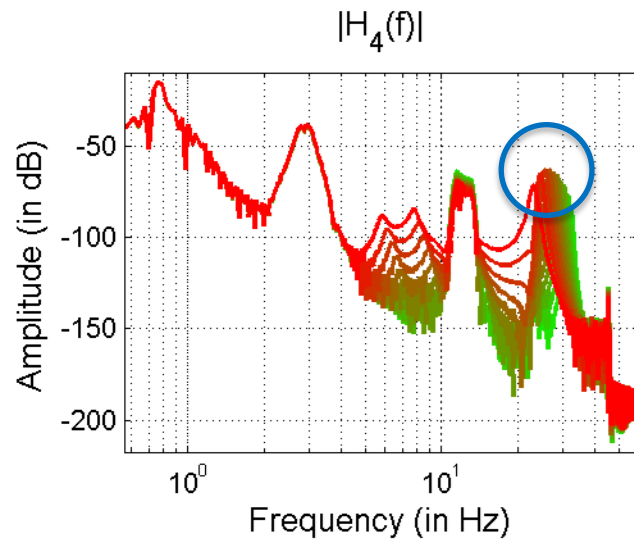
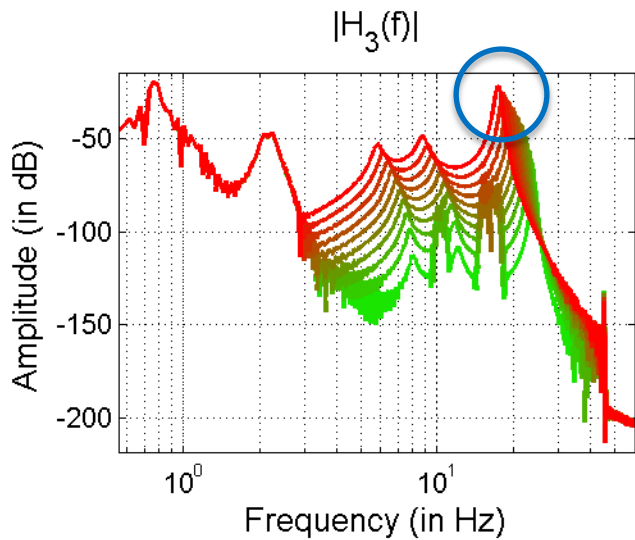
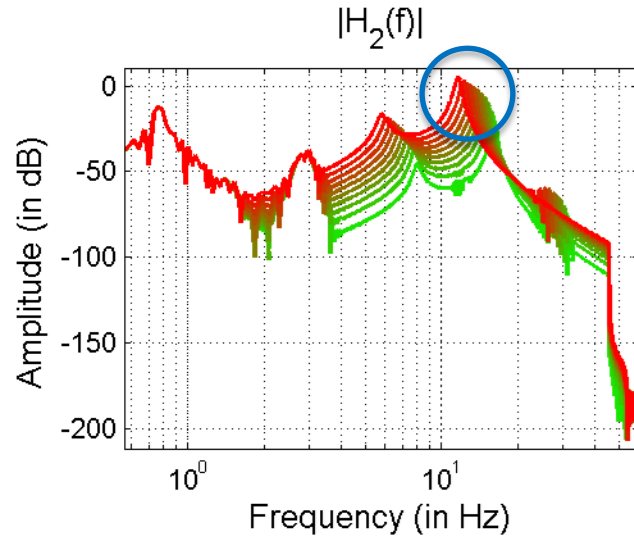
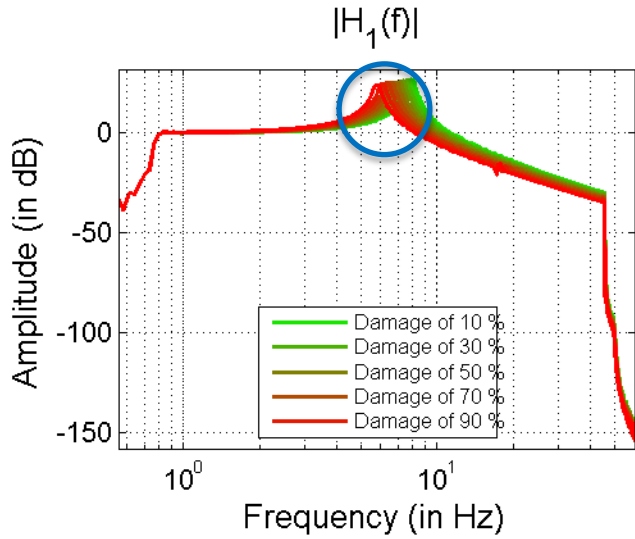
$$M = 450 \text{ kg}, k = 1.2 \times 10^6 \text{ N/m}$$

- $x_g^{\ddot{\cdot}}$ : L'accélération du sol est un sinus glissant exponentiel

- $f_1 = 0.7 \text{ Hz}$
- $f_2 = 50 \text{ Hz}$
- $T = 364 \text{ s}$
- $f_s = 4 \text{ kHz}$

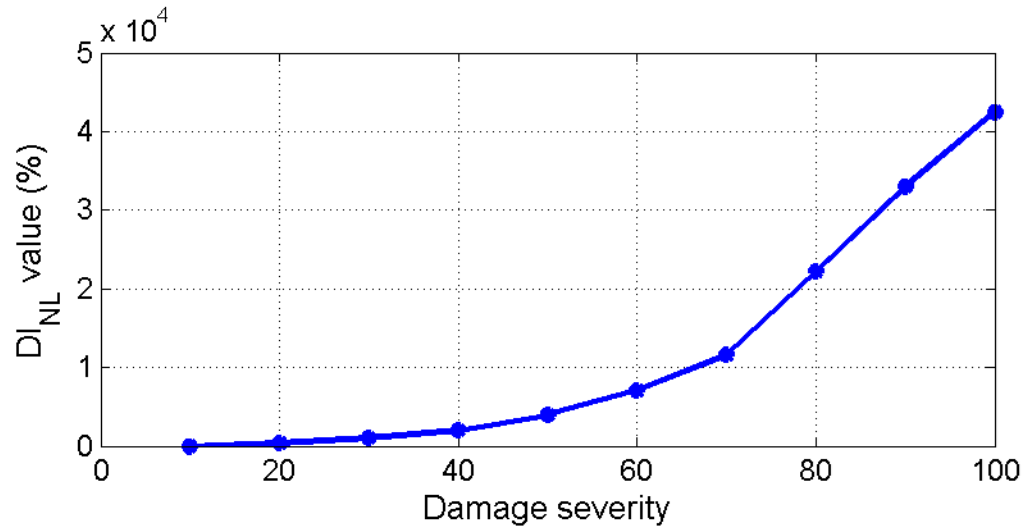
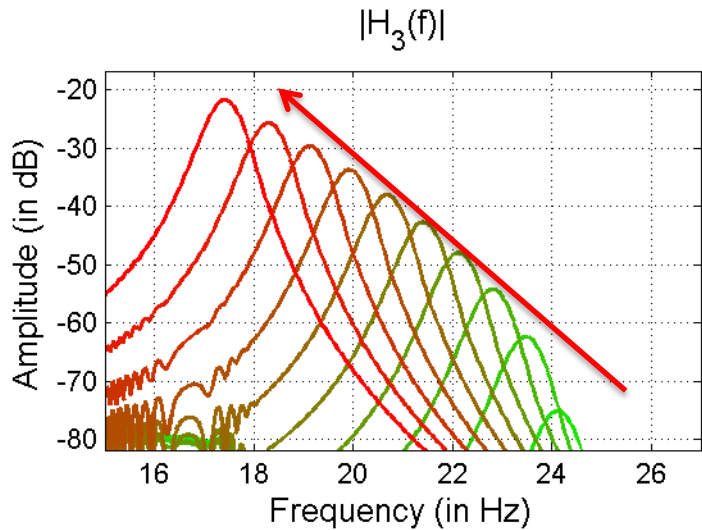
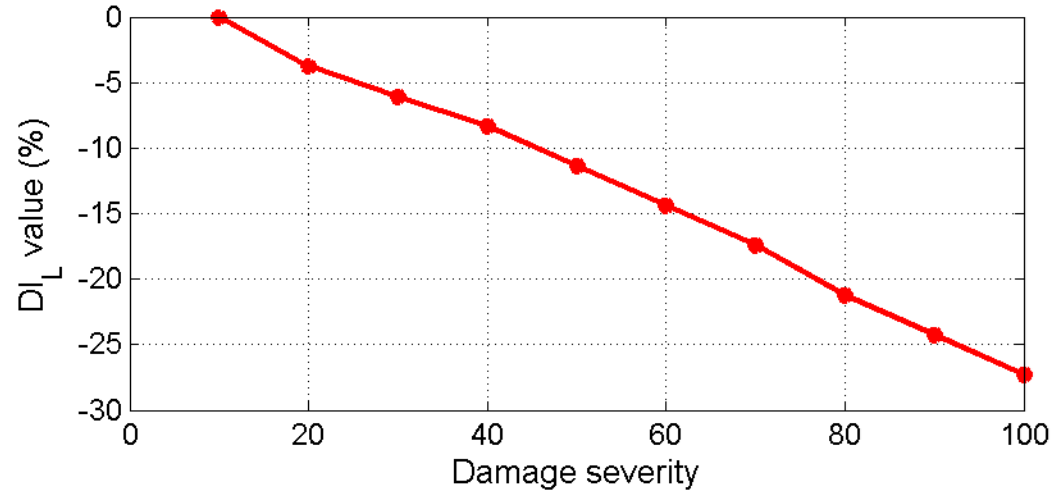
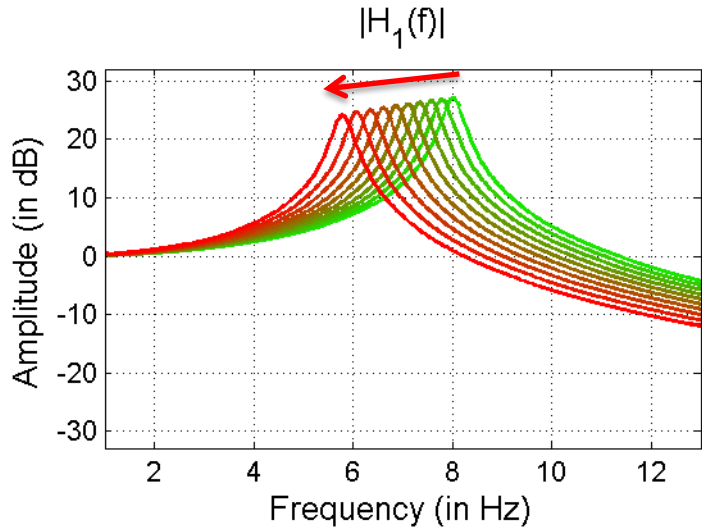
# II.b) Quantification de dommages

## Résultats de simulation



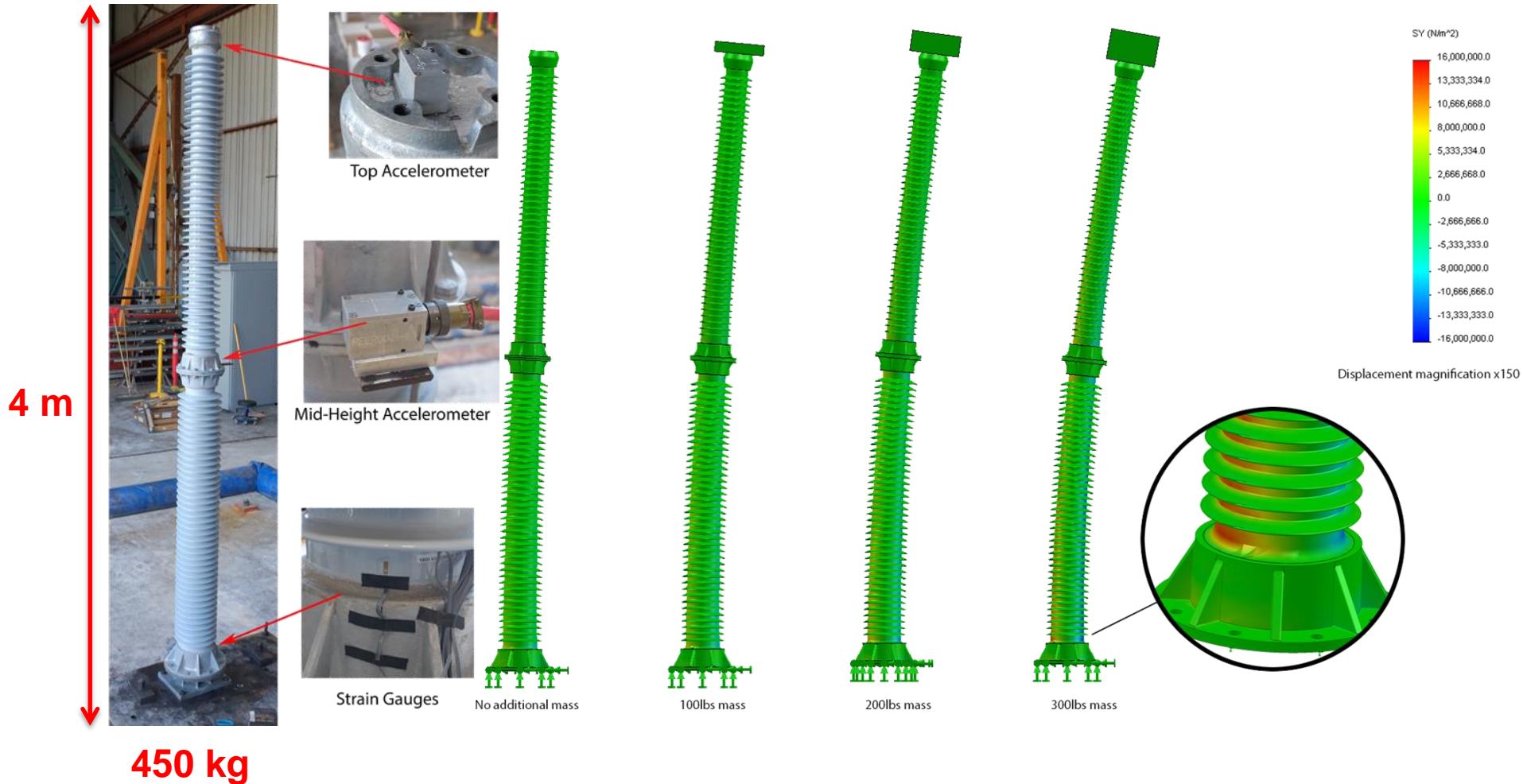
# II.b) Quantification de dommages

## Résultats de simulation



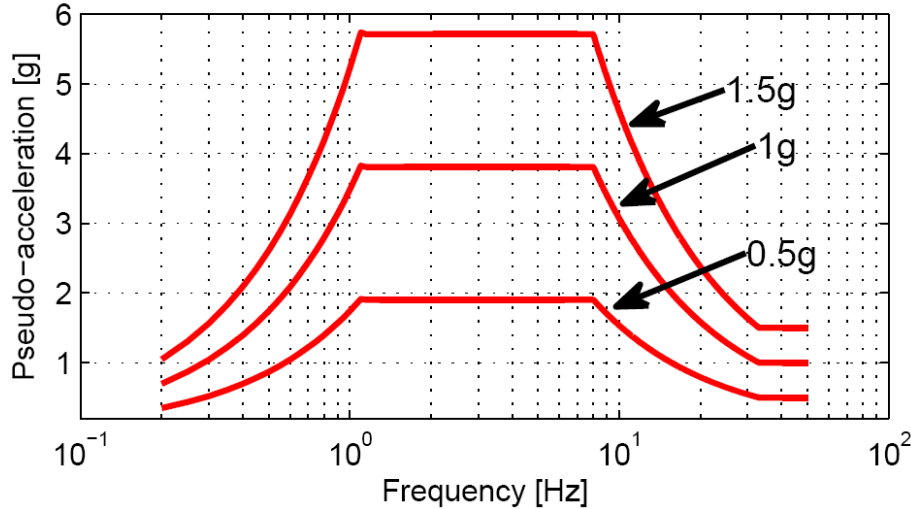
# II.b) Quantification de dommages

## Validation expérimentale



# II.b) Quantification de dommages

## Séquence d'endommagement



- ❑ Séismes au standard IEEE
- ❑ Un sinus glissant exponentiel entre chaque séisme.
  - $f_1 = 0.7 \text{ Hz}$
  - $f_2 = 50 \text{ Hz}$
  - $T = 364 \text{ s}$
  - $f_s = 4 \text{ kHz}$

#	Severity	Signal and configuration
0	0	Healthy specimen
1	1	IEEE-693 (1 g)
2	2	IEEE-693 (1.5 g)
3	2	IEEE-693 (1.5 g)
4	2	IEEE-693 (1.5 g)
5	2	IEEE-693 (1.5 g)
6	2	IEEE-693 (1.5 g)
7	3	IEEE-693 (random waveform) (1.5 g)
8	3	IEEE-693 (random waveform) (1.5 g)
9	4	IEEE-693 (1 g) with 68 kg mass
10	5	IEEE-693 (1 g) with 90 kg mass
11	5	IEEE-693 (1 g) with 90 kg mass
12	6	IEEE-693 (1.5 g) with 90 kg mass
13	6	IEEE-693 (1.5 g) with 90 kg mass
14	7	IEEE-693 (1 g) with 136 kg mass
15	7	IEEE-693 (1 g) with 136 kg mass
16	8	IEEE-693 (1.5 g) with 136 kg mass

# II.b) Quantification de dommages

## Rupture du spécimen



### Structural Health Monitoring of High voltage Electrical Switch Ceramic Insulators

Marc Rébillat  
Nazih Mechbal

*DYSCO Group, PIMM, Arts et Métiers ParisTech, Paris, France*

Clément B. Barthes  
Khalid M. Mosalam

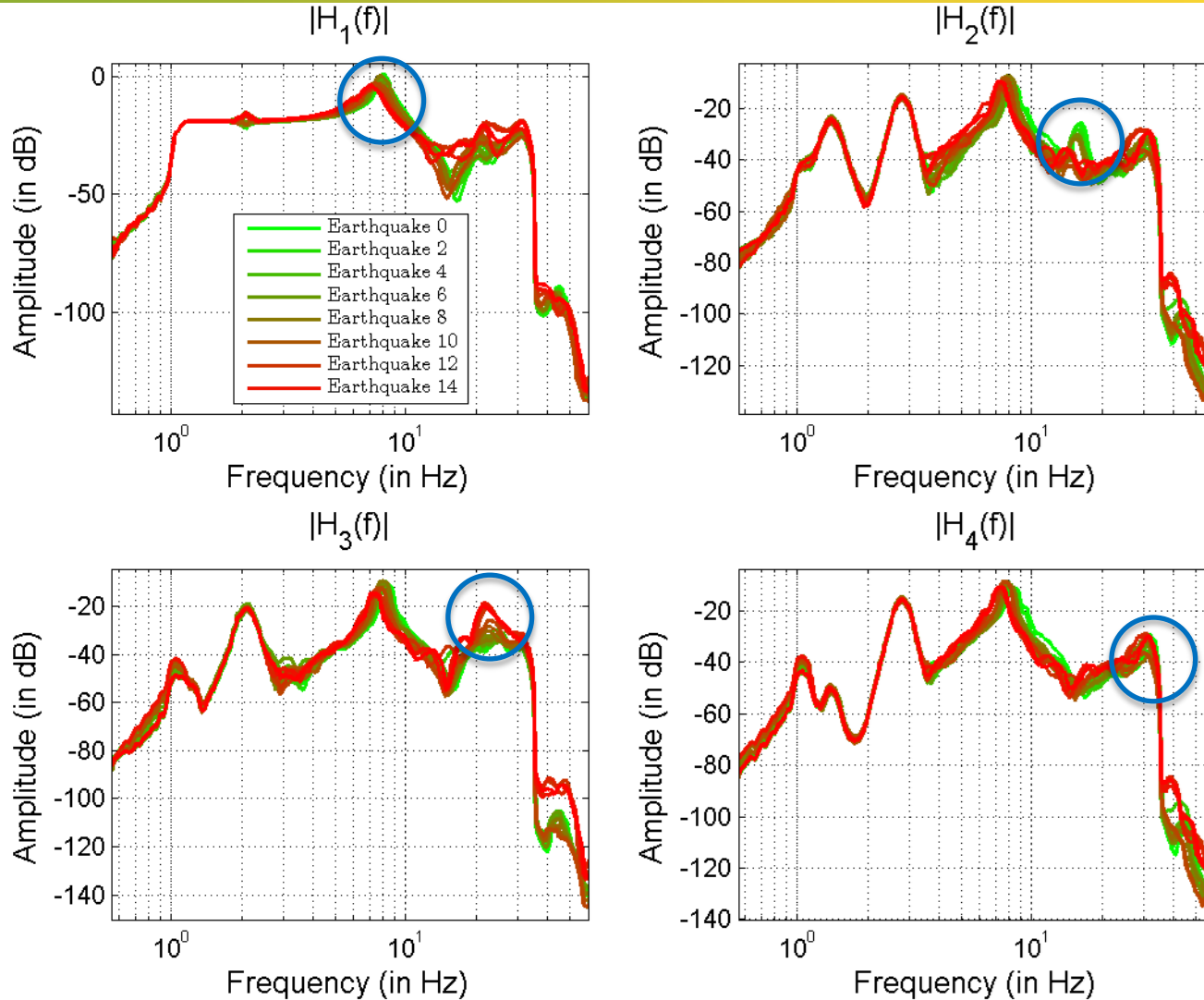
*PEER, University of California Berkeley, CA, USA*

4 m



# II.b) Quantification de dommages

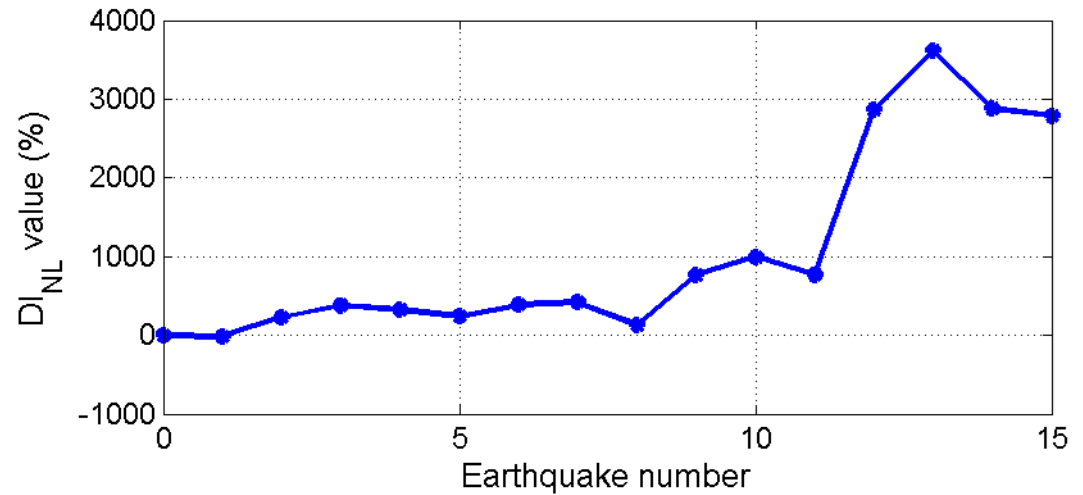
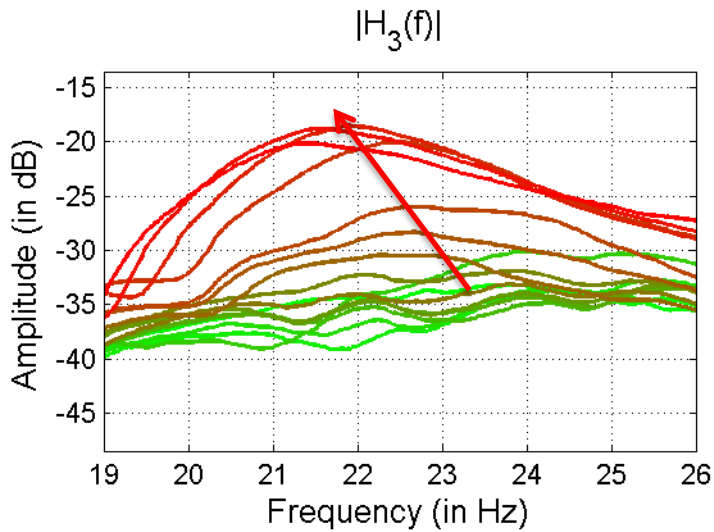
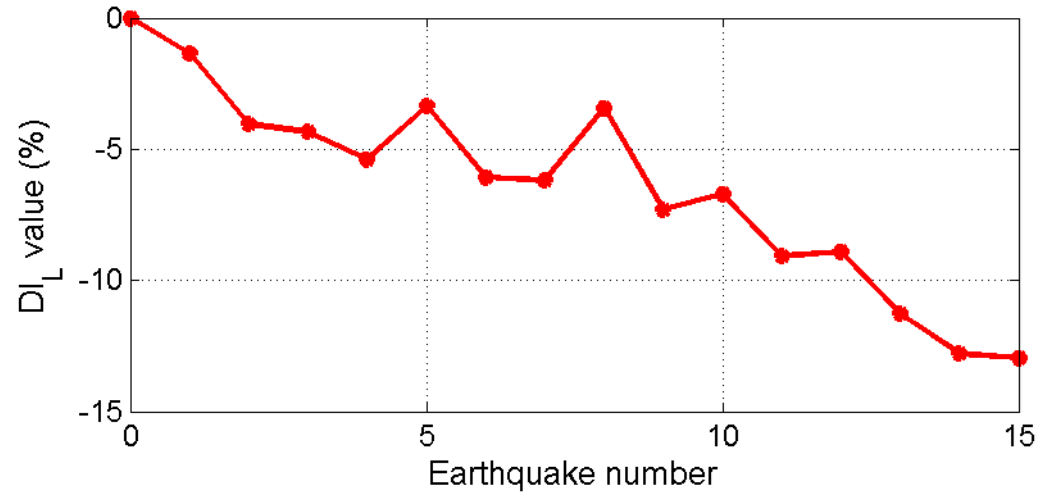
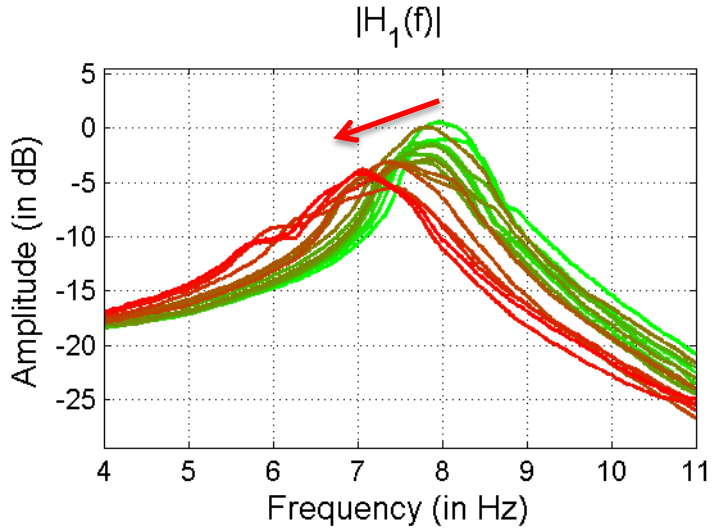
## Résultats expérimentaux





# II.b) Quantification de dommages

## Résultats expérimentaux



### I) Les modèles de Hammerstein en parallèle

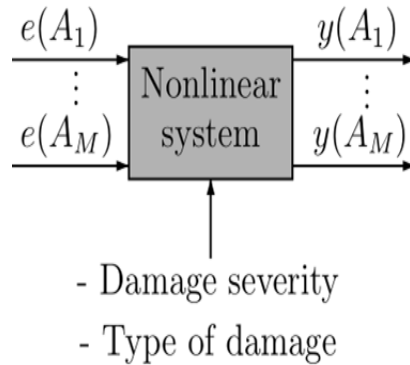
- a) Qu'est-ce que c'est?
- b) Comment les estimer?

### II) Application au contrôle santé des structures

- a) Détection de dommages dans des matériaux composites
- b) Quantification de dommages en génie civil
- c) **Vers la classification...**

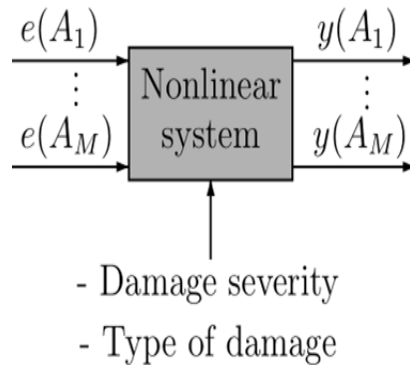
## II.c) Vers la classification...

### Structure endommagée à l'étude



## II.c) Vers la classification...

### Estimation d'un modèle non-linéaire

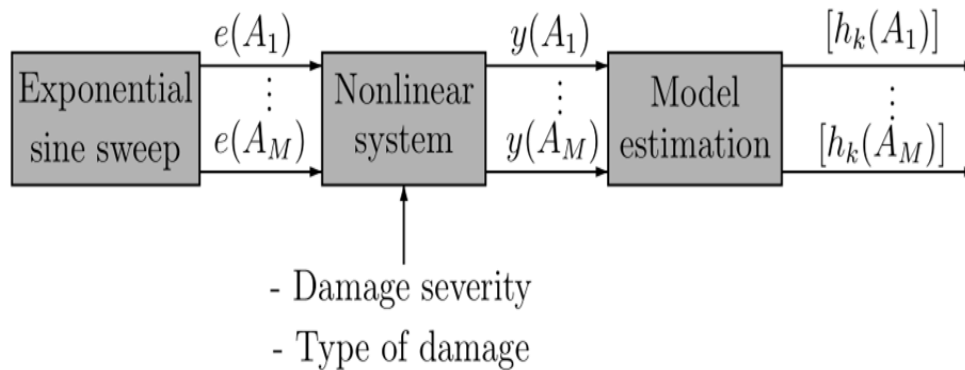


### Procédure:

- 1) Estimation d'un **modèle non-linéaire** à différentes amplitudes

## II.c) Vers la classification...

### Estimation d'un modèle non-linéaire

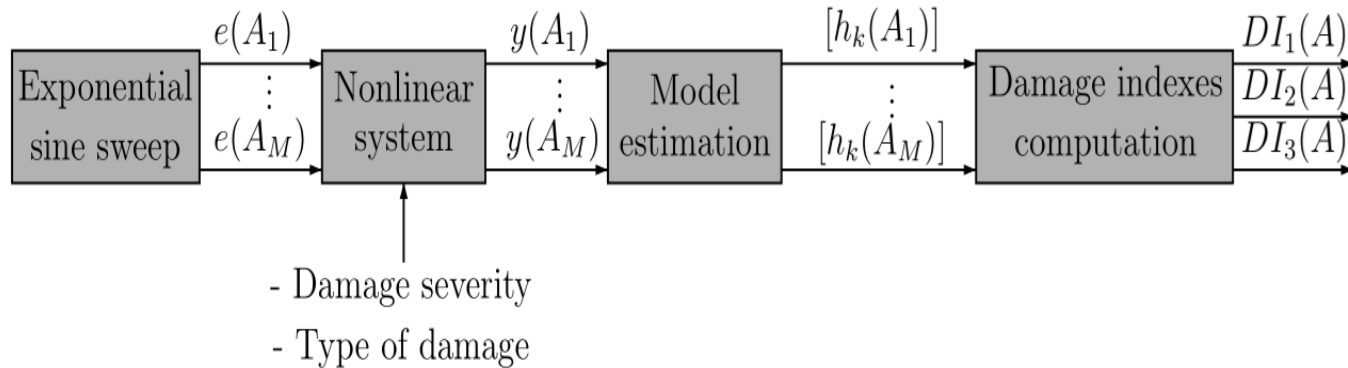


### Procédure:

- 1) Estimation d'un **modèle non-linéaire** à différentes amplitudes

## II.c) Vers la classification...

### Calcul des indices d'endommagement

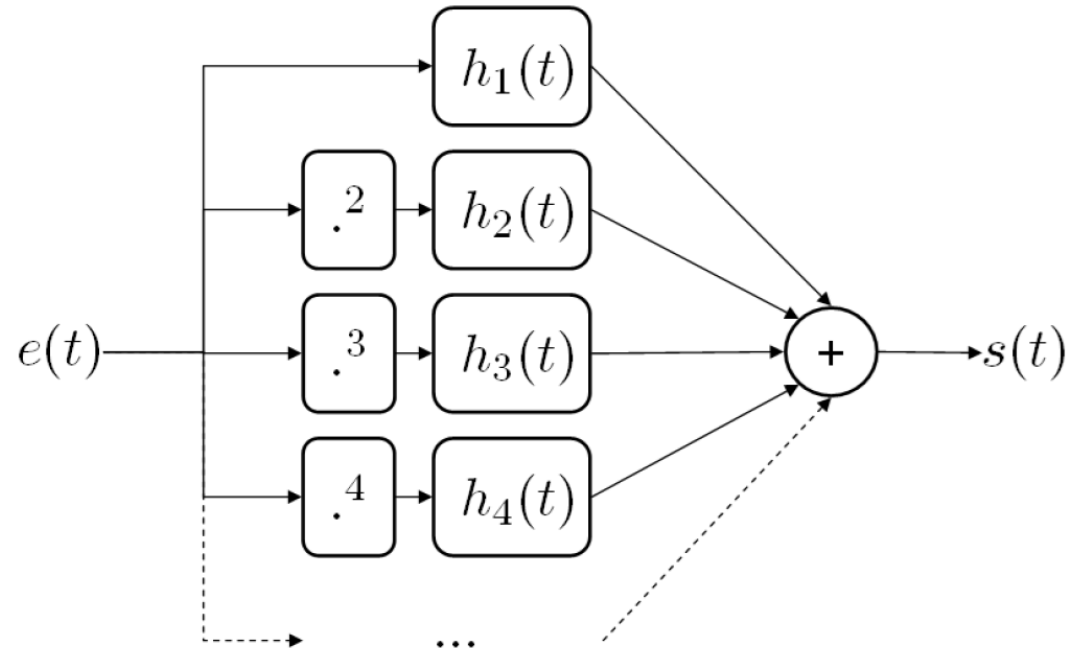


### Procédure:

- 1) Estimation d'un **modèle non-linéaire** à différentes amplitudes
- 2) Calcul des **indices d'endommagement** à différentes amplitudes

# II.c) Vers la classification...

## Calcul des indices d'endommagement



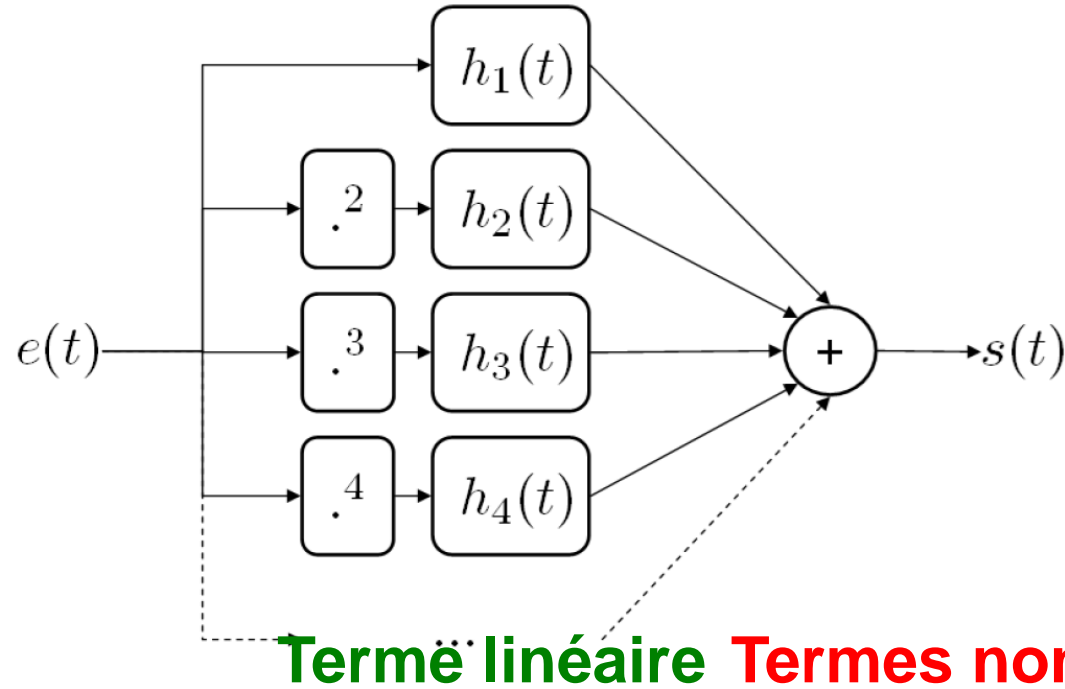
$$s(t) = s_L(t) + s_{NL}(t)$$

Terme linéaire

Terme non-linéaire

# II.c) Vers la classification...

## Calcul des indices d'endommagement



$$s(t) = s_L(t) + s_{NL}(t) = s_L(t) + [s_Q(t) + s_E(t)]$$

Nonlinéarités paires

Nonlinéarités impaires



## II.c) Vers la classification...

### Calcul des indices d'endommagement

#### □ Indice linéaire:

$$DI_1(A) = \frac{f_D(A) - f_H(A)}{f_H(A)}$$

- Difference entre **la fréquence de résonance** du premier mode à l'état sain et endommagé pour l'amplitude  $A$ .

#### □ Indices non-linéaires:

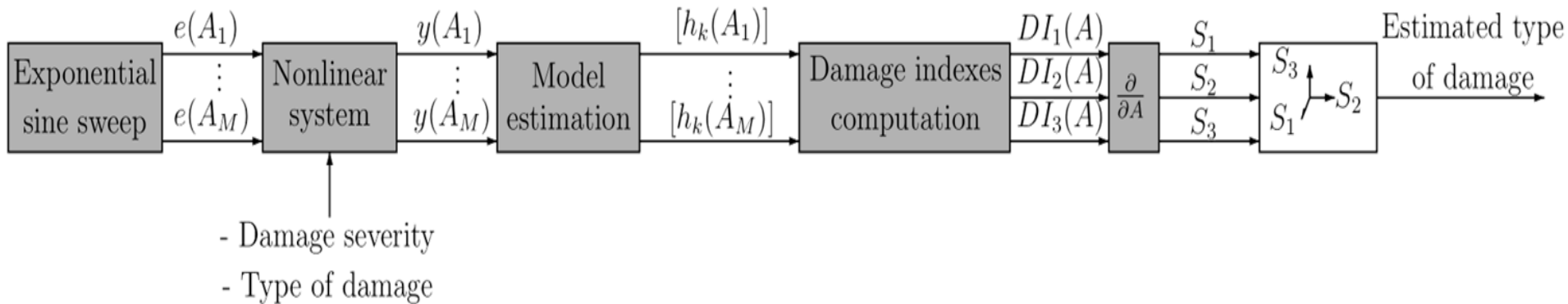
$$DI_2(A) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} |S_{NL}(A, f)|^2 df}{\int_{f_1}^{f_2} |S_L(A, f)|^2 df}$$

$$DI_3(A) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} |S_E(A, f)|^2 df}{\int_{f_1}^{f_2} |S_O(A, f)|^2 df}$$

- Ratio entre **les énergies linéaire et non-linéaires** pour l'amplitude  $A$ .
- Ratio entre les **énergies non-linéaires paires et impaires** pour l'amplitude  $A$ .

## II.c) Vers la classification...

### Calcul des indices d'endommagement

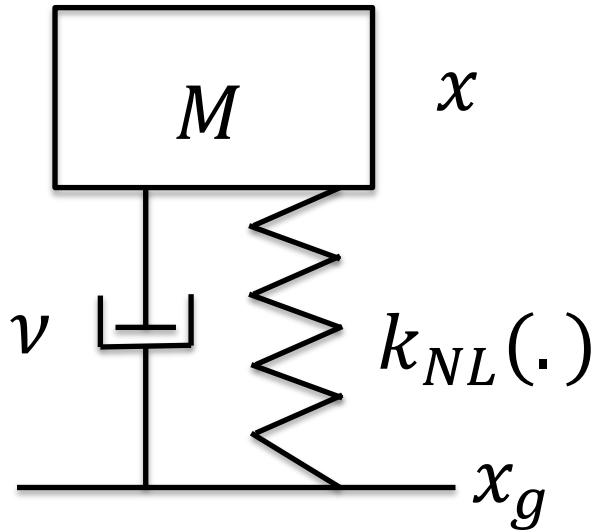


### Procédure:

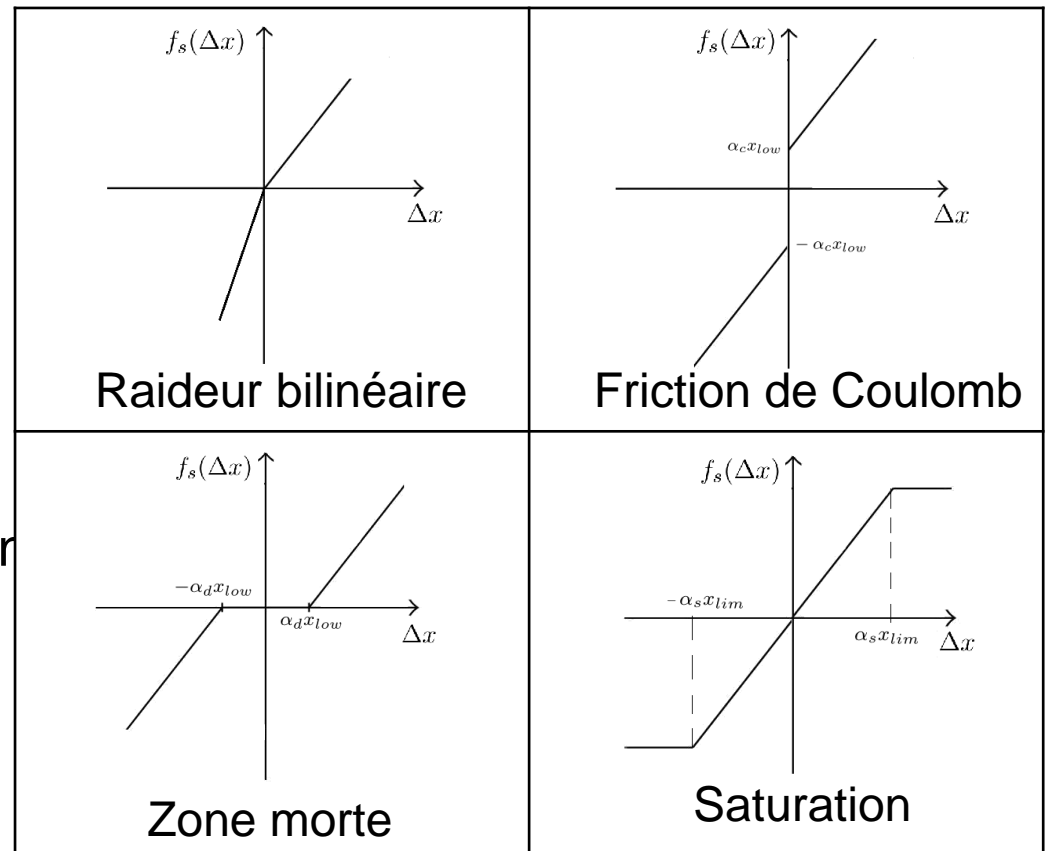
- 1) Estimation d'un **modèle non-linéaire** à différentes amplitudes
- 2) Calcul des **indices d'endommagement** à différentes amplitudes
- 3) Calcul de la **pente** des indices avec l'amplitude  $A$
- 4) Estimation du type de dommage le plus probable (**classification**)

# II.c) Vers la classification...

## Structure endommagée simulée



### ☐ Dommages simulés par différentes raideurs non-linéaires



### ☐ Paramètres

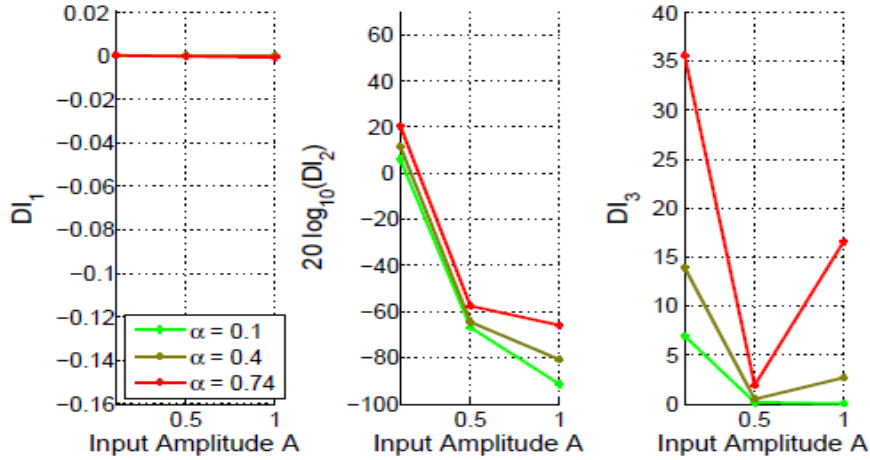
$M = 450 \text{ kg}$ ,  $k = 1.2 \times 10^6 \text{ N/m}$

☐  $x_g^{\ddot{\cdot}}$ : L'accélération du sol est un glissant exponentiel

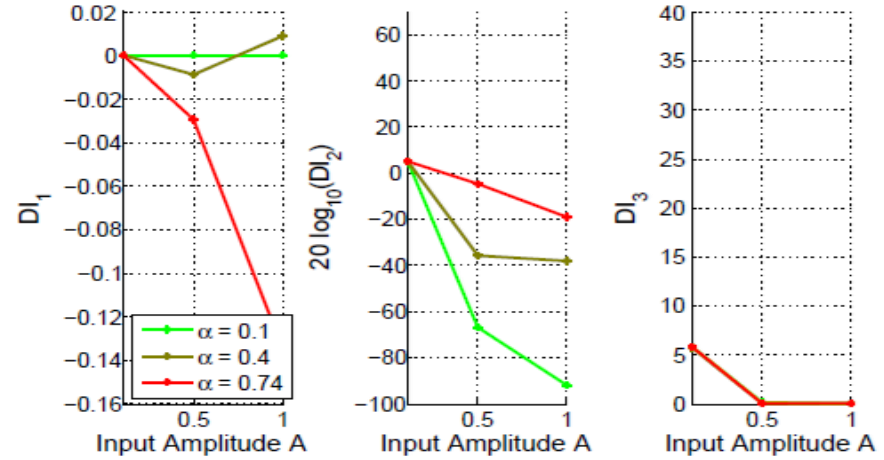
- $f_1 = 0.7 \text{ Hz}$
- $f_2 = 50 \text{ Hz}$
- $T = 364 \text{ s}$
- $f_s = 4 \text{ kHz}$

# II.c) Vers la classification...

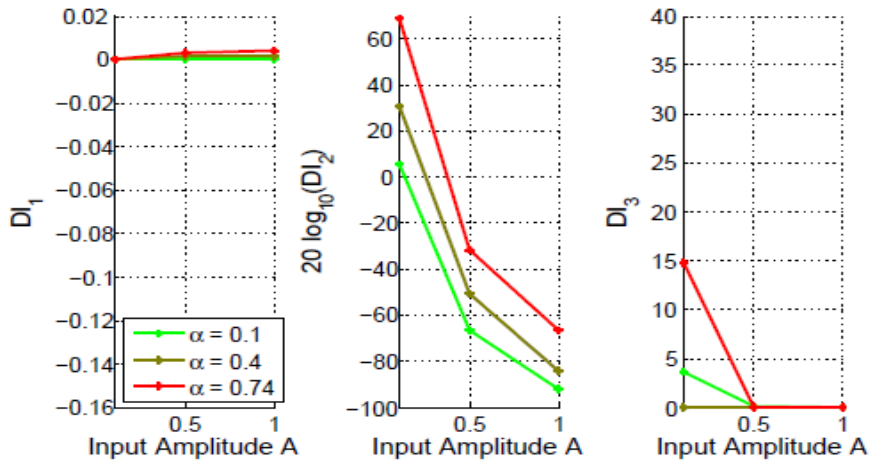
## Evolution des indices avec l'amplitude A



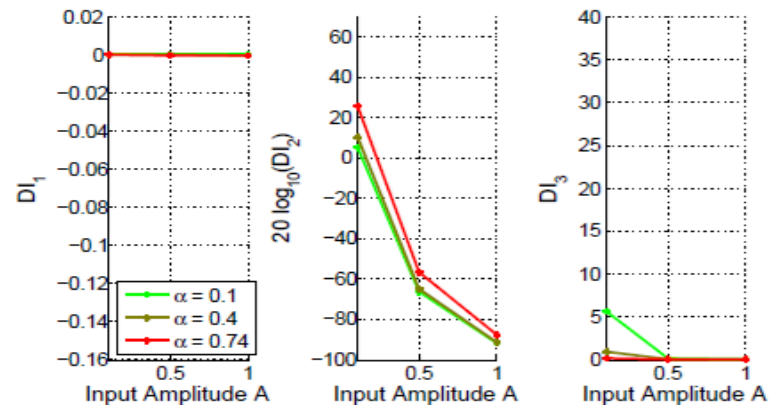
(a) Bilinear stiffness



(b) Saturation



(c) Dead zone

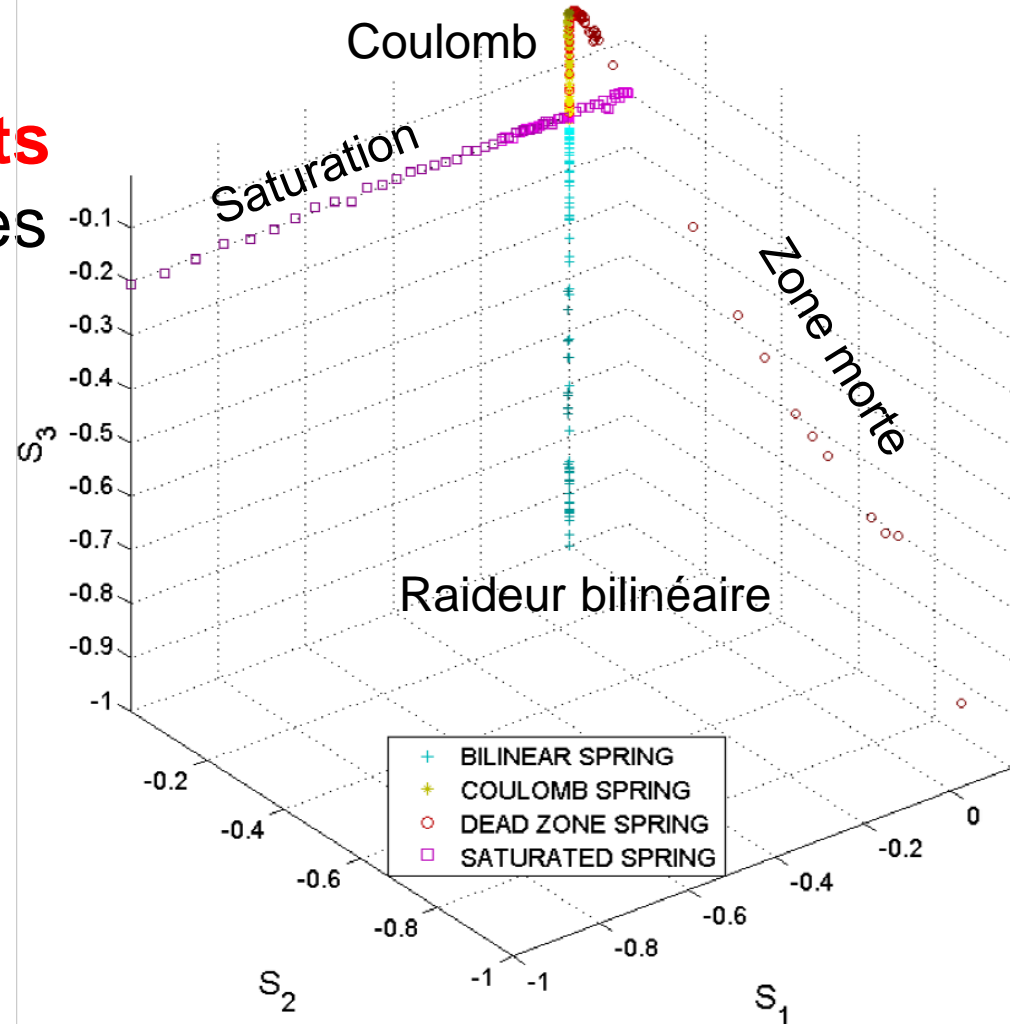


(d) Coulomb friction

# II.c) Vers la classification...

## Espace de classification 3D

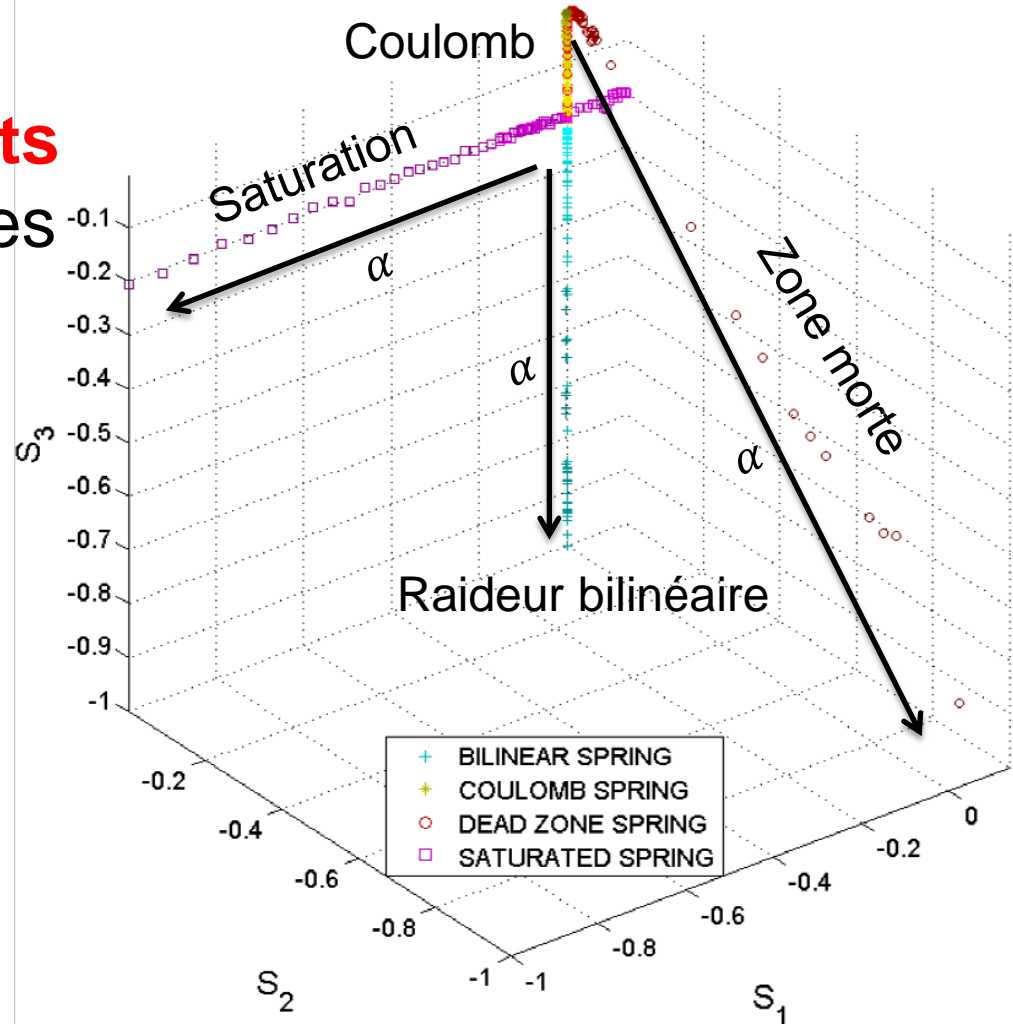
□ **Différents comportements qualitatifs** des quatre types de dommages dans cet espace.



# II.c) Vers la classification...

## Espace de classification 3D

- **Différents comportements qualitatifs** des quatre types de dommages dans cet espace.
  
- **Evolution monotone avec la sévérité** dans l'espace de classification.



**Existe t'il un modèle nonlinéaire “général” pouvant être facilement estimé et permettant de construire des indices d'endommagement efficaces?**

- Modèles de Hammerstein en parallèle **assez généraux**
- Modèles de Hammerstein en parallèle **faciles à estimer**
- Plusieurs indices d'endommagement proposés
- Capacités de **détecter, quantifier et classifier** étudiées
- Etudes **numériques et expérimentales**

# Conclusion

## Perspectives

- ❑ Quelles **structures physiques** sont capables de représenter les modèles de Hammerstein en parallèle?
- ❑ Quels **indices** sont les plus **efficaces** pour le SHM?
- ❑ Les indices **non-linéaires** sont ils **plus sensibles ou robustes** que les indices **linéaires**?
- ❑ Comment prendre en compte les **incertitudes d'estimation** dans l'approche SHM non-linéaire?





# Questions?

## Contrôle santé des structures basé sur la signature dynamique non-linéaire de dommages

**Marc REBILLAT**

**Nazih MECHBAL**

**Rafik HAJRYA**

**Myriam BAKIR**

*DYSCO Group, PIMM, Arts et Métiers ParisTech, Paris, France*

**Clément B. BARTHES**

**Khalid M. MOSALAM**

*PEER, University of California Berkeley, CA, USA*

