



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 RÉBILLAT - 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





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

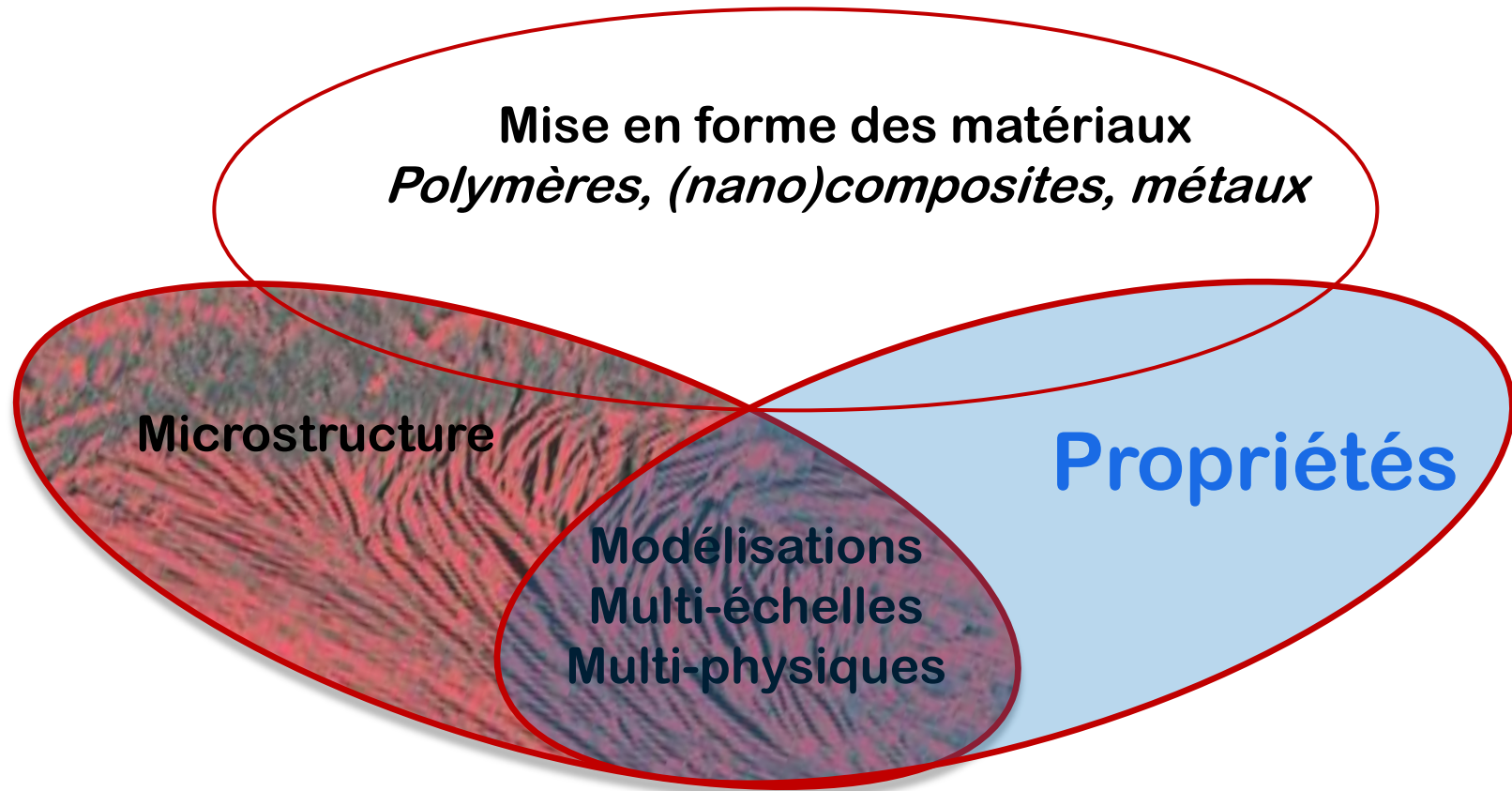
Clément B. BARTHES

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:

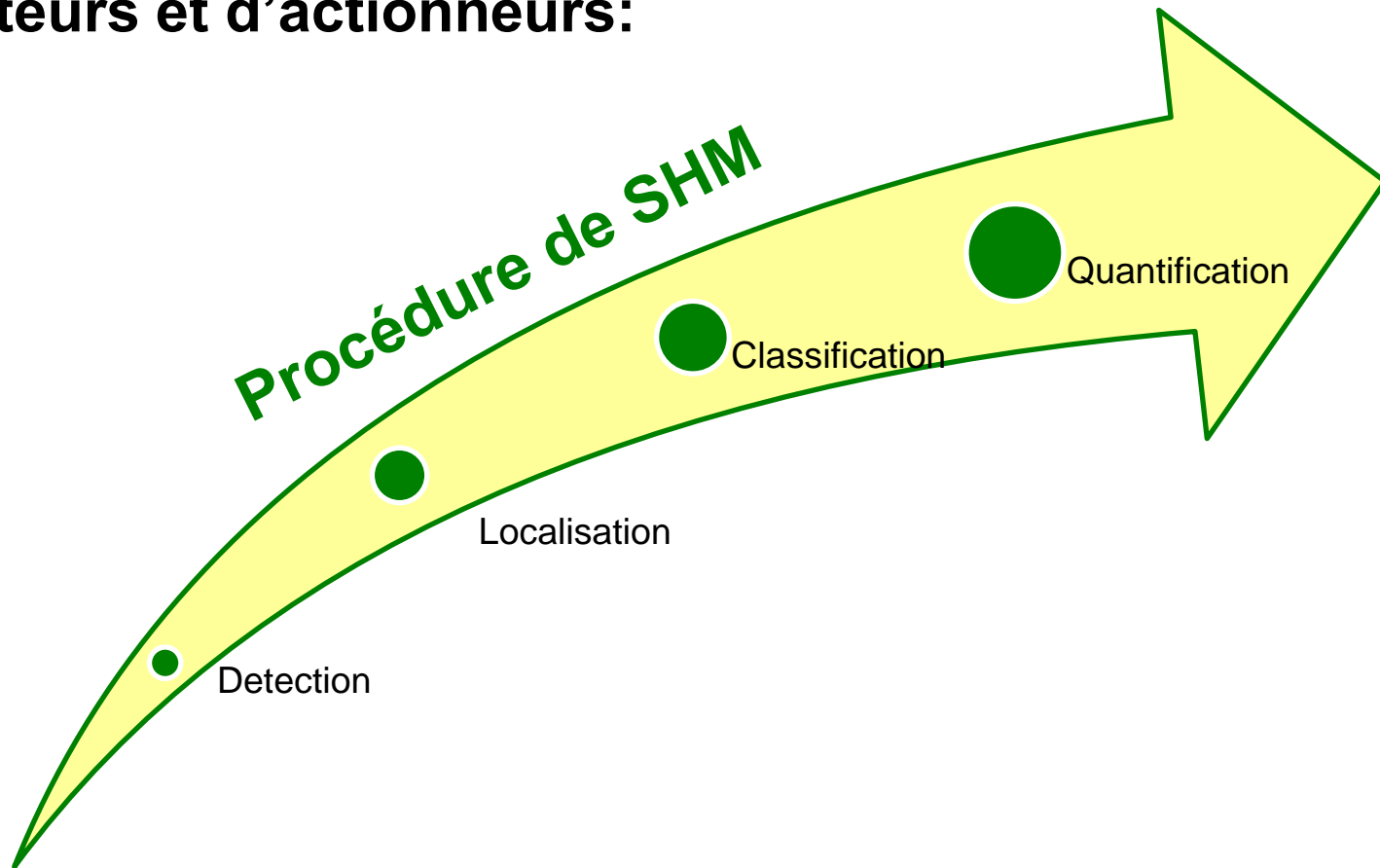
- Aéronautique
- Génie civil



Introduction

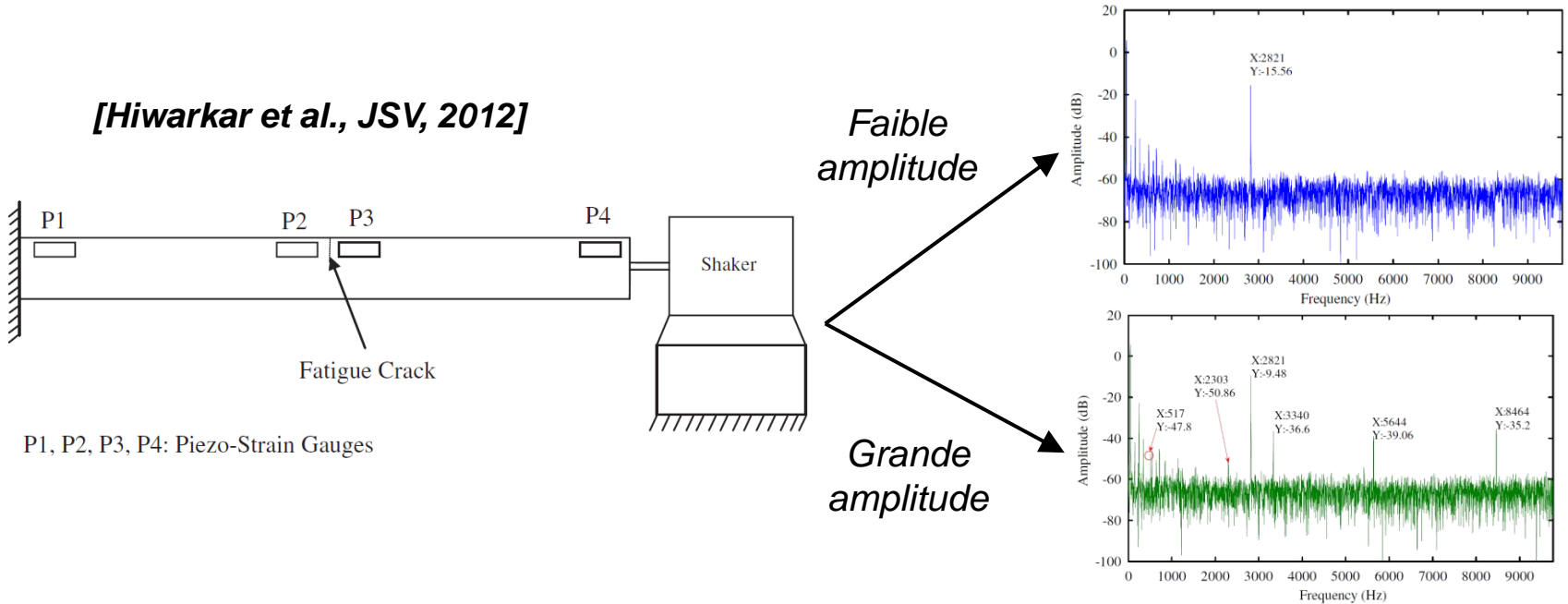
Le contrôle de la santé des structures (SHM) [Worden, 2007]

- 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

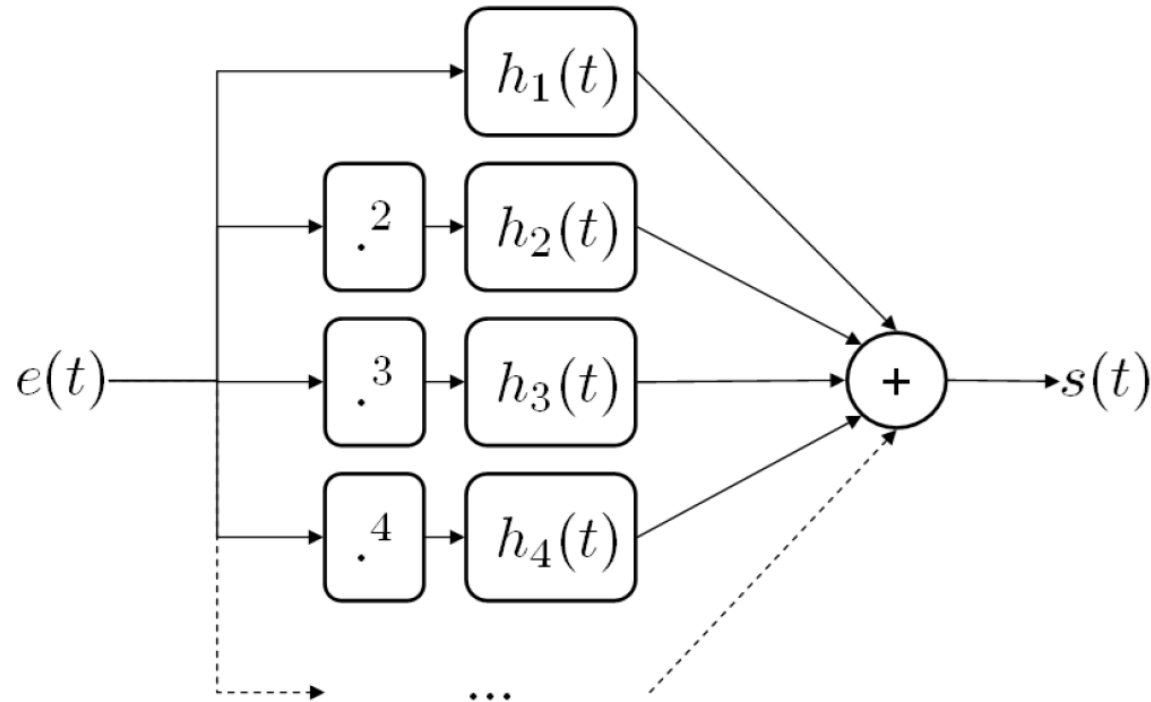
- a) Qu'est-ce que c'est?
- b) Comment les estimer?

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

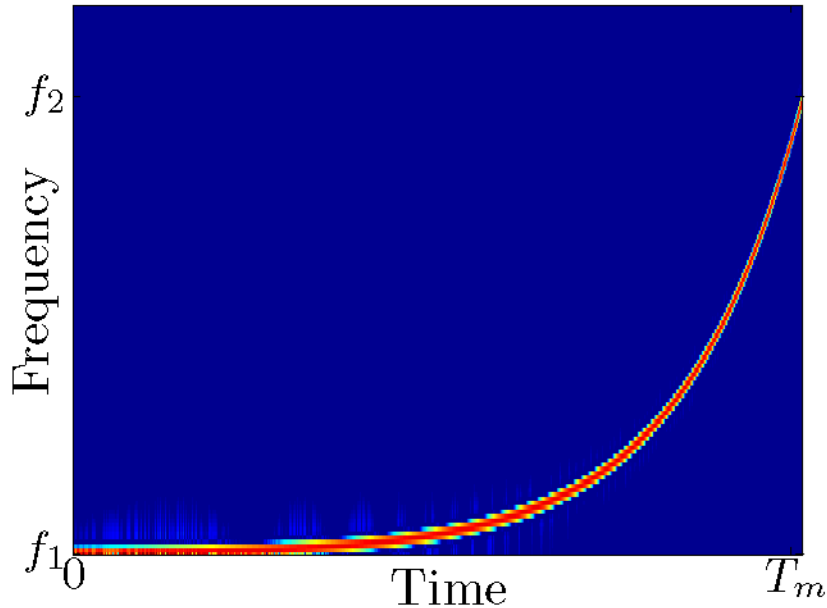


- ❑ Sous-classe des séries de Volterra: **assez général**
- ❑ Représenté par N filtres linéaires: **plutôt simple**
 - **Presque non-paramétrique** (un seul paramètre: N)

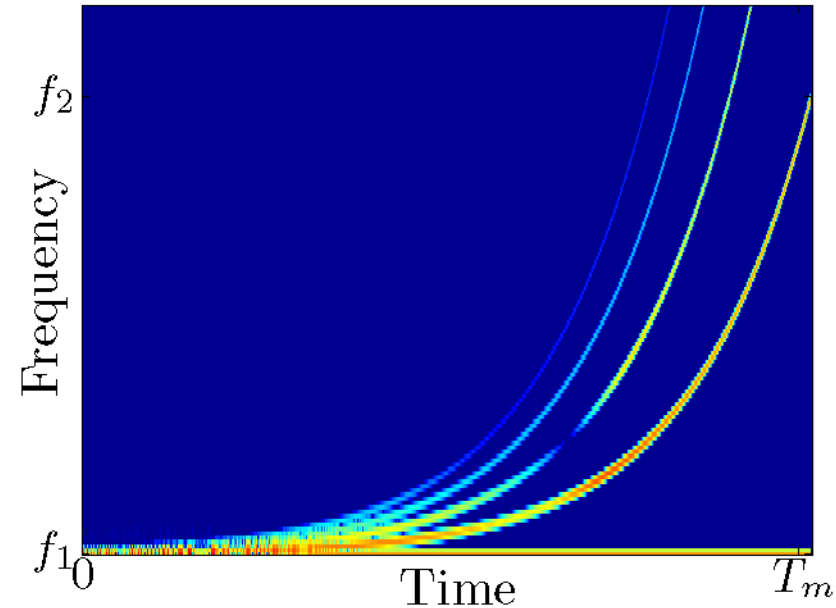
I) Modèle non-linéaire

Les sinus glissants exponentiels

Entrée $e(t)$



Sortie $s(t)$



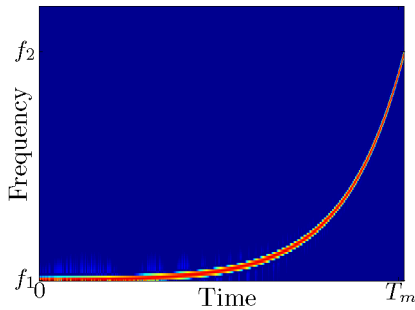
□ Pour le $k^{\text{ième}}$ harmonique:

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

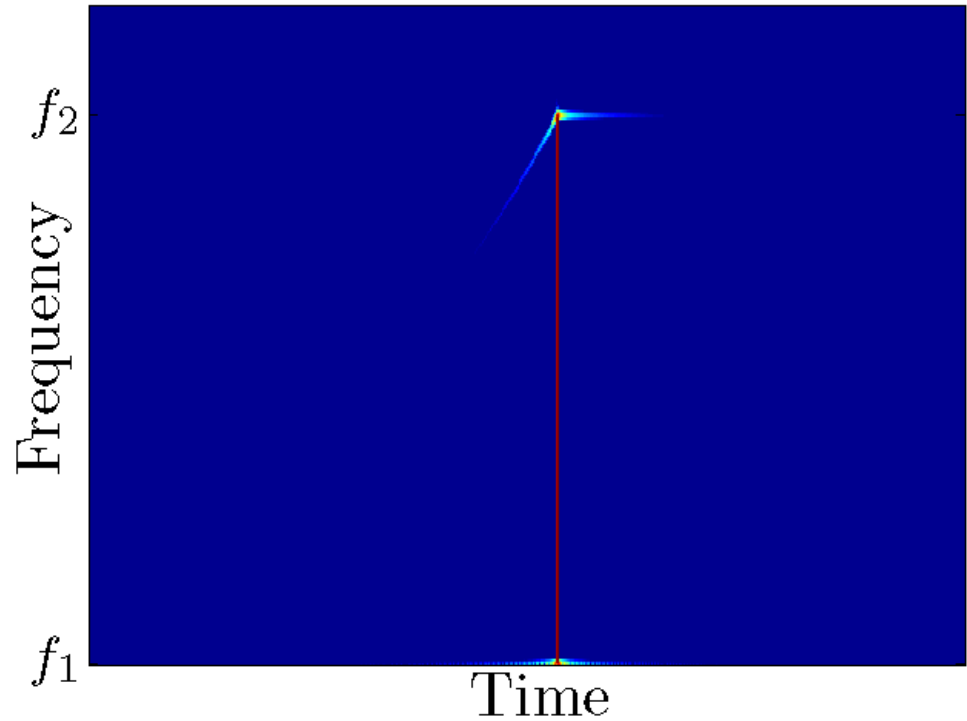
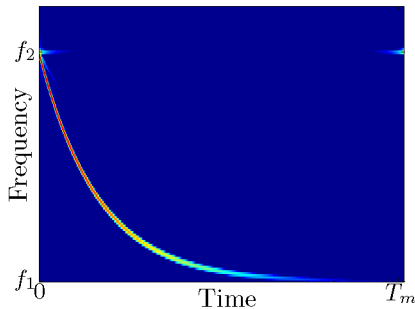
Entrée $e(t)$



*

=

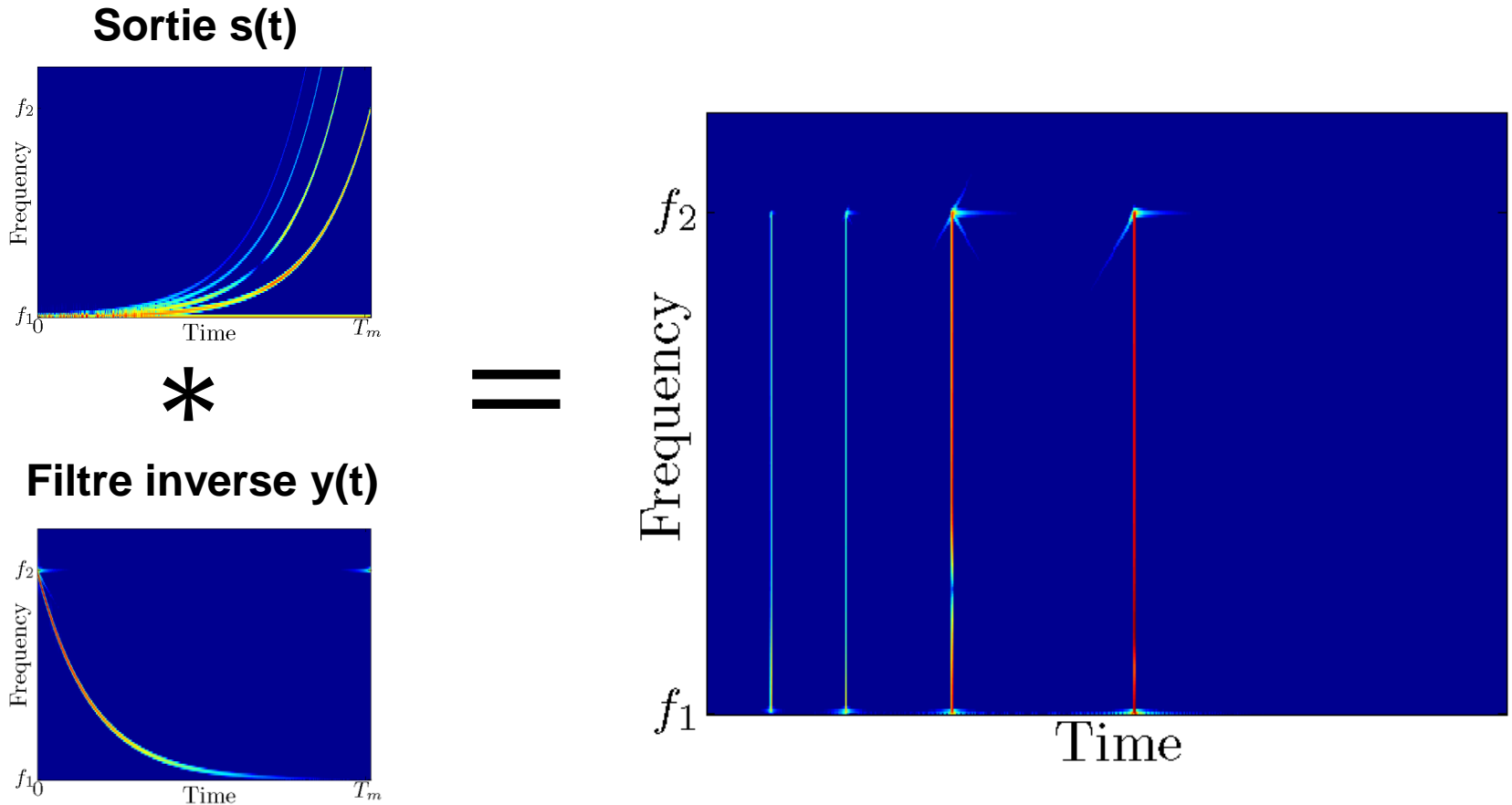
Filtre inverse $y(t)$



Alignement temporel de l'énergie du fondamental

I) Modèle non-linéaire

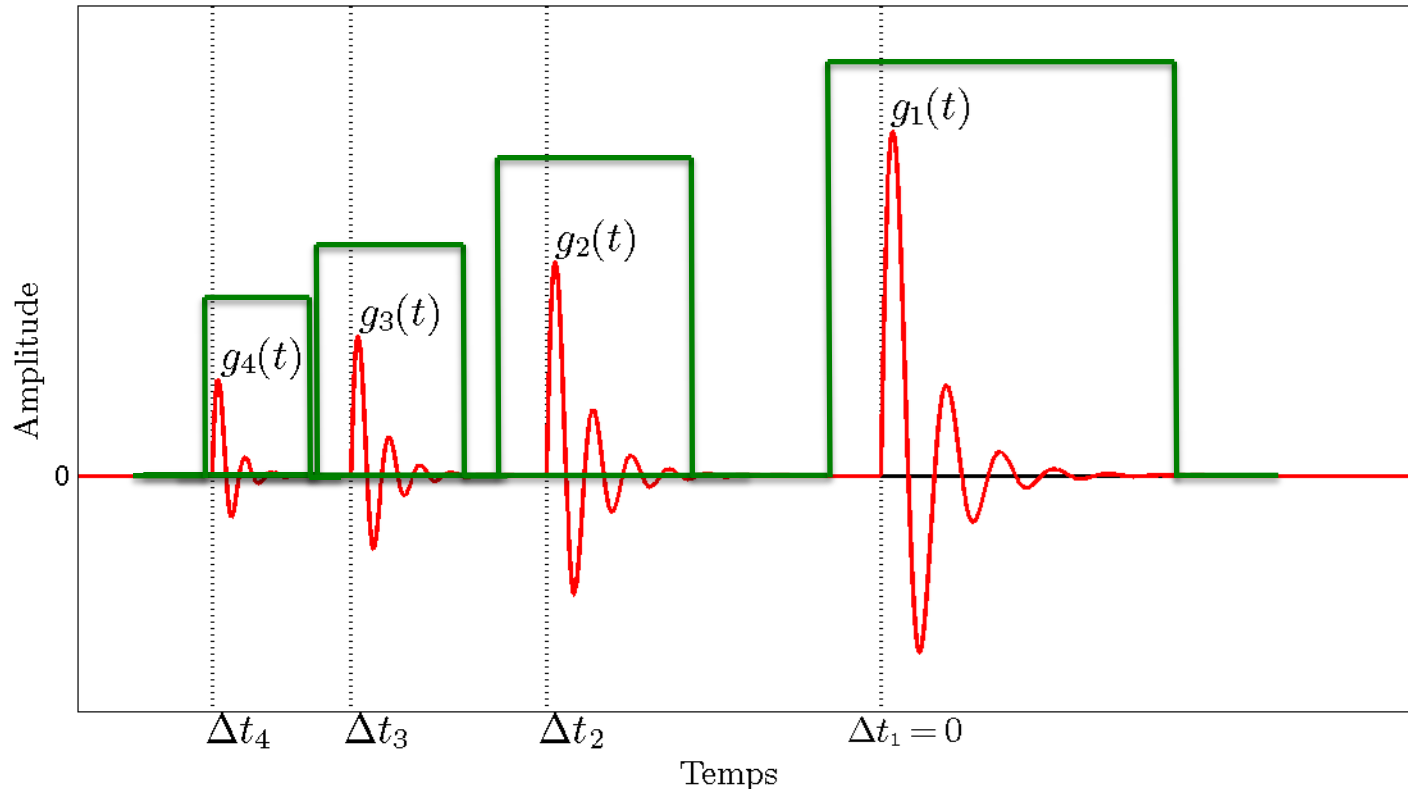
Effet du filtre inverse sur la sortie



□ Alignement temporel de l'énergie des harmoniques

I) Modèle non-linéaire

Fenêtrage temporel



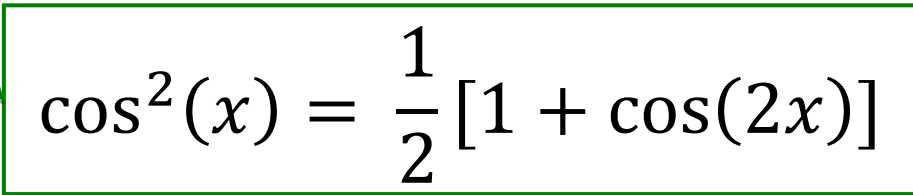
□ $g_n(t)$: contributions des différents harmoniques

I) Modèle non-linéaire

Des harmoniques aux puissances...

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

$g_2(t)$: contribution du
2nd 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

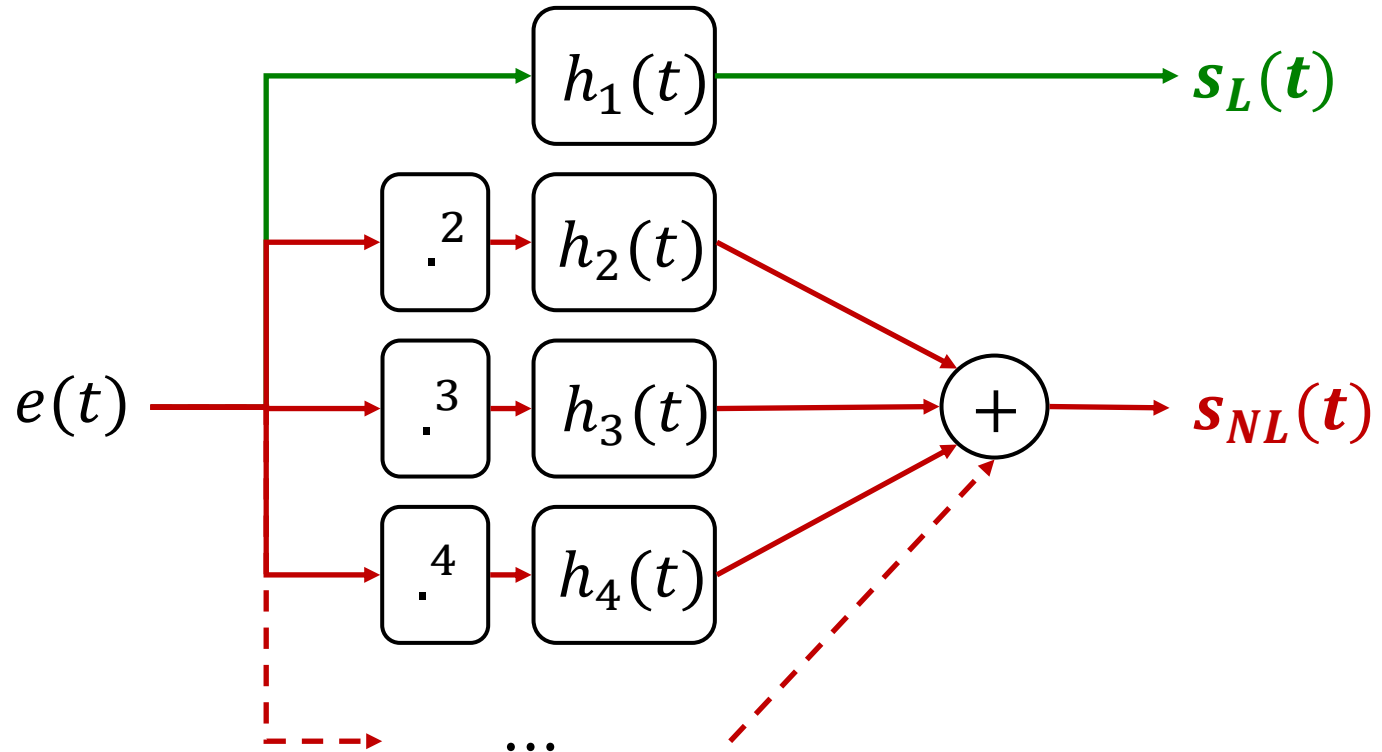
- a) Qu'est-ce que c'est?
- b) Comment les estimer?

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

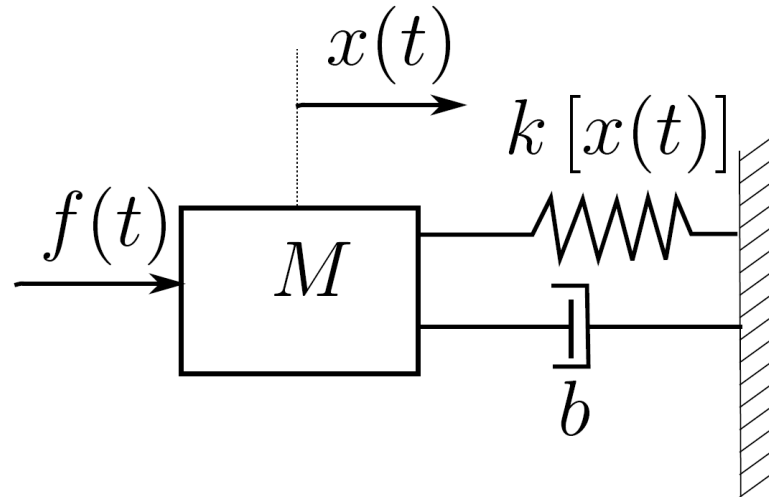
□ **Ratio** entre l'énergie dans la partie **linéaire** et la partie **non-linéaire** de la sortie.

- $S_L(f)$ 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”

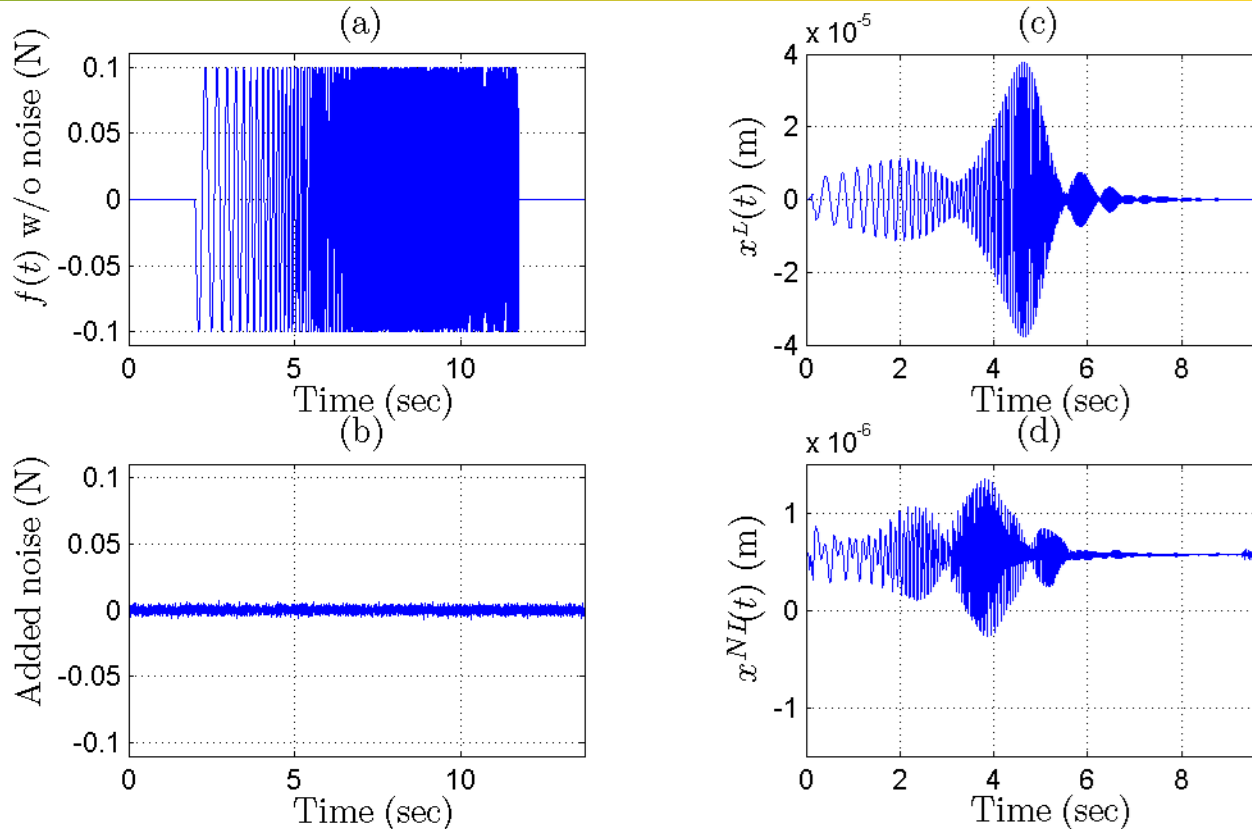
- **Dommage** simulé par une **raideur bilinéaire**

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

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

II.a) Détection de dommages

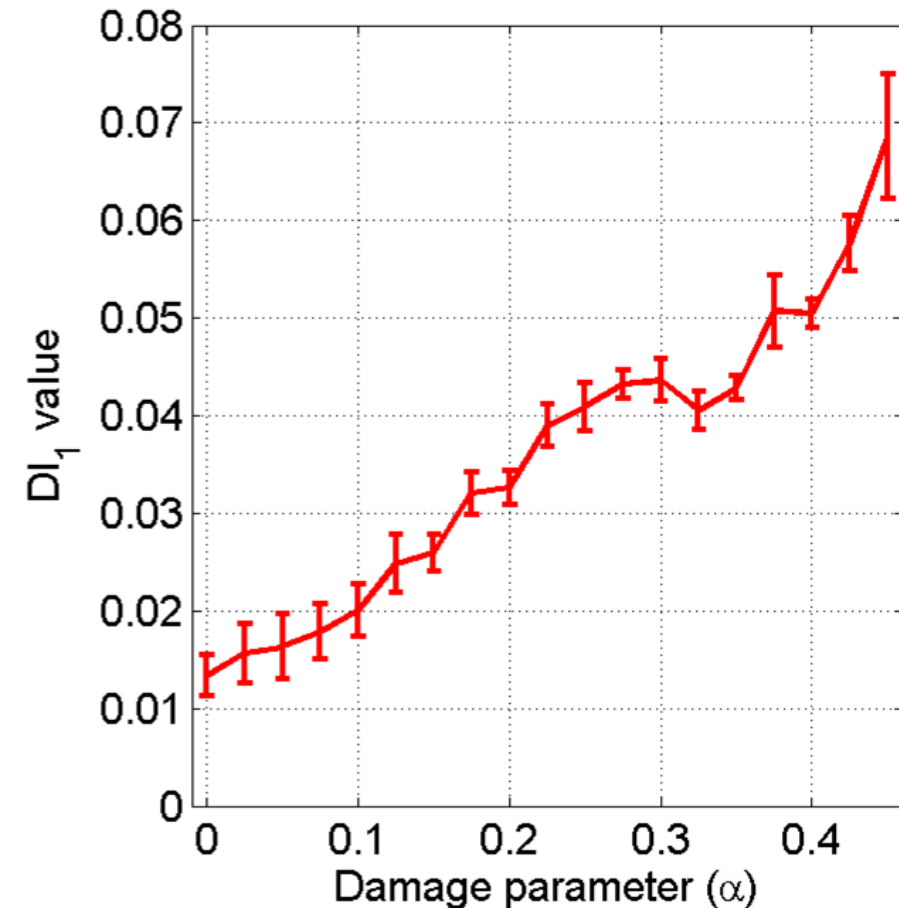
Signaux d'entrée et de sortie



- (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

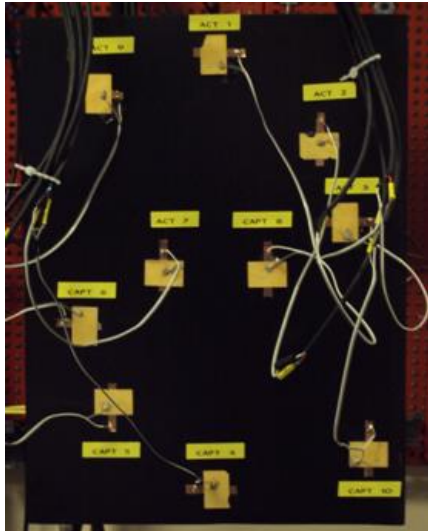
Résultats numériques



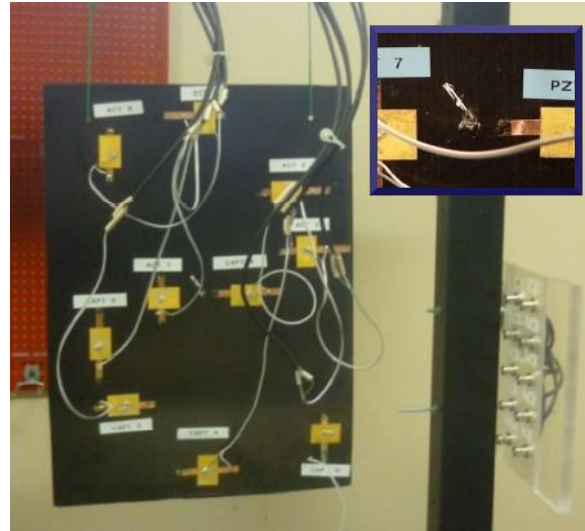
- Le **dommage** est **detecté**
- Evolution monotone** du dommage avec la sévérité
- DI_1 est **robuste** au bruit environnemental

II.a) Détection de dommages

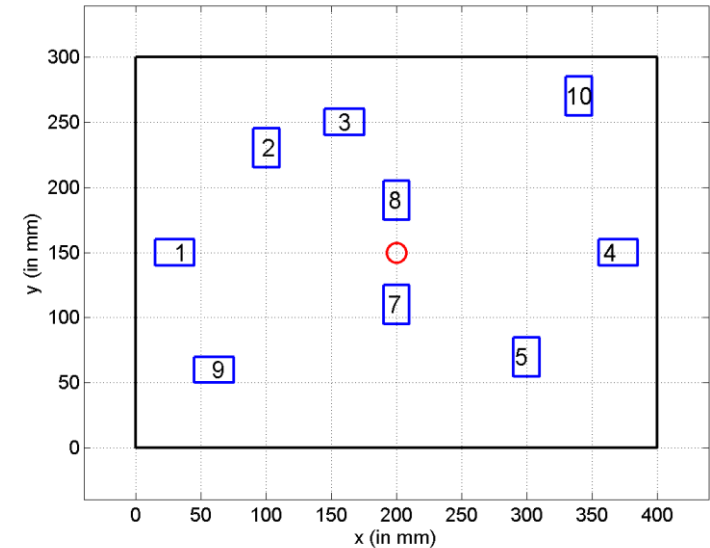
Validation expérimentale



Plaque saine



Plaque endommagée

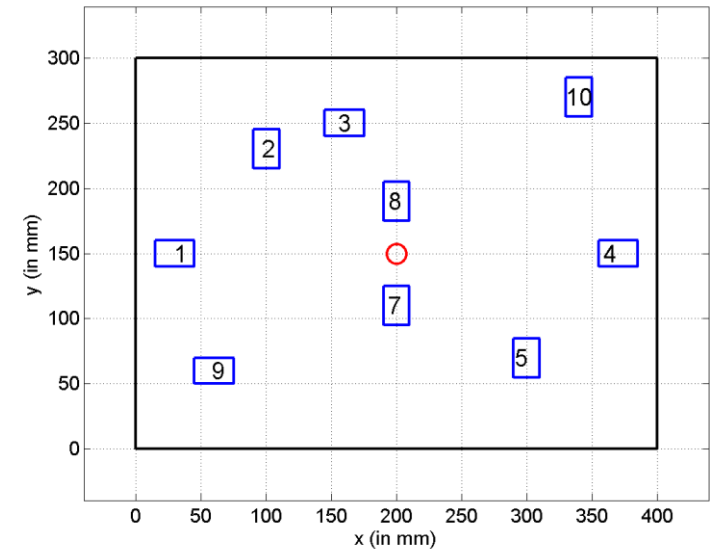
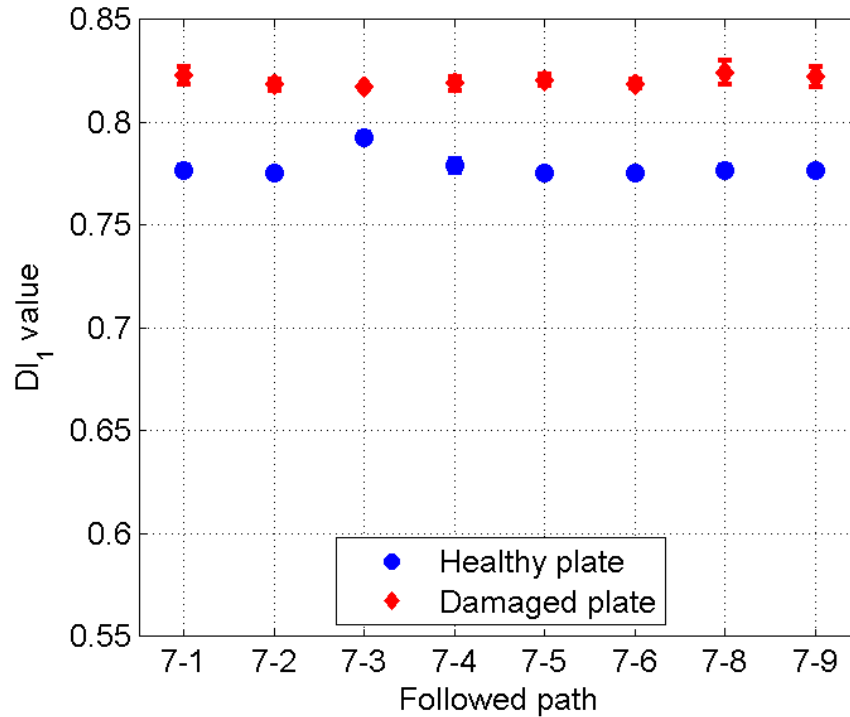


Répartition des PZTs

- Echantillon de fuselage aéronautique
- Entrée: $[f_1 f_2] = [0.1 \ 30]$ kHz
- SNR ≈ 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.

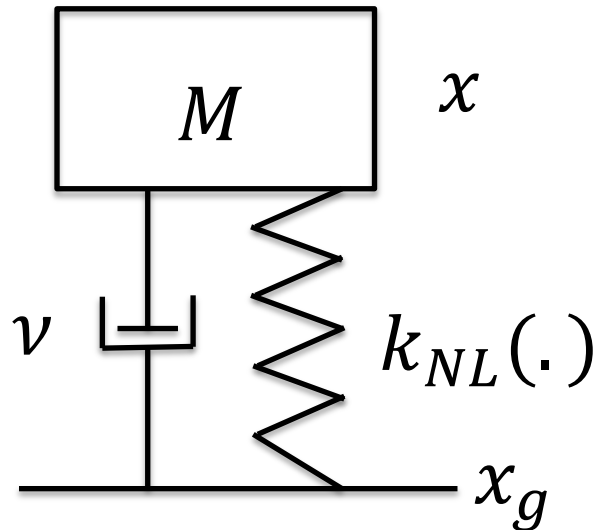
□ **Indice d'endommagement nonlinéaire:** $DI_{NL} = \frac{R_3(f_D) - R_3(f_H)}{R_3(f_H)}$

- 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

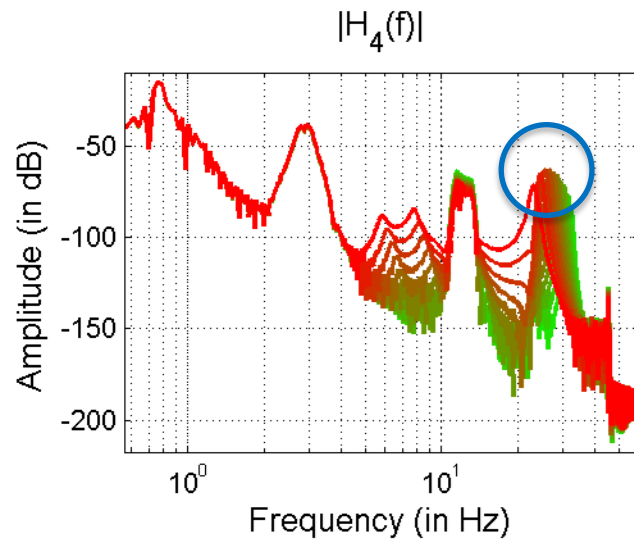
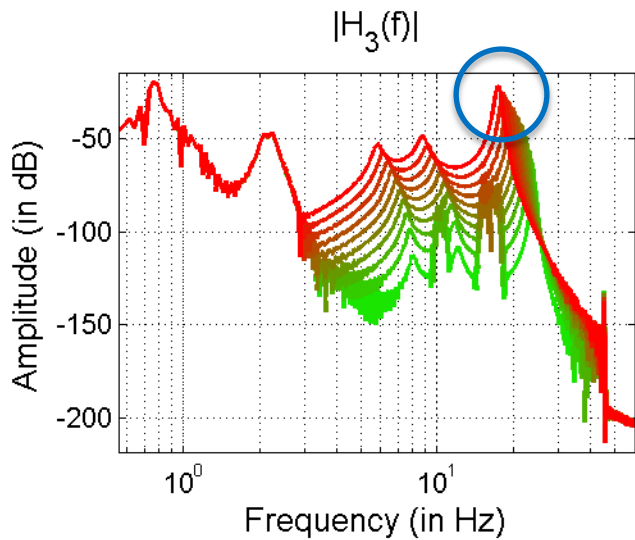
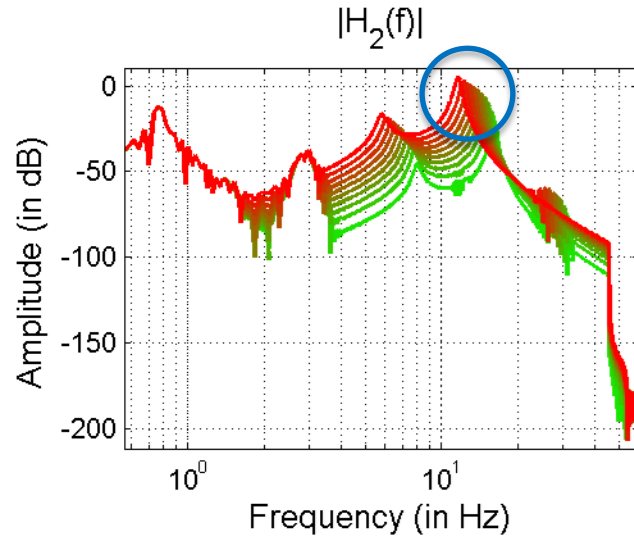
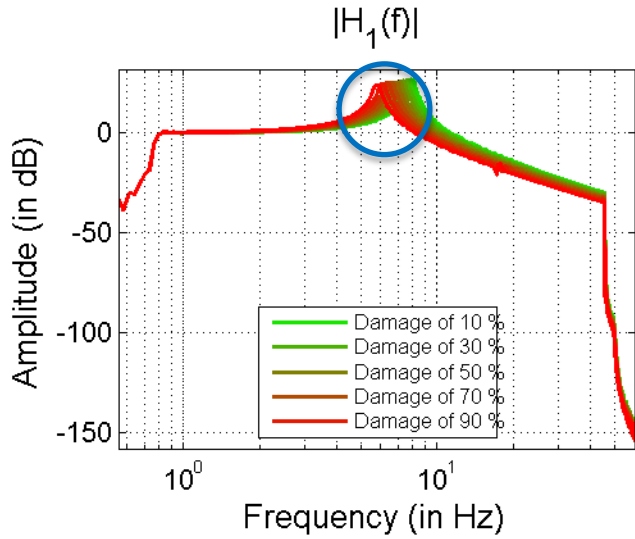
$$M = 450 \text{ kg}, k = 1.2 \times 10^6 \text{ N/m}$$

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

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

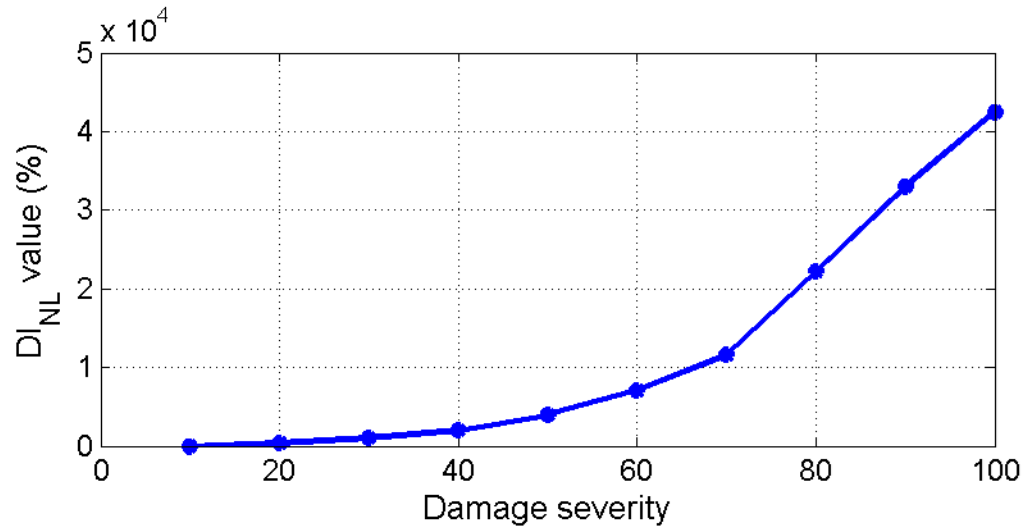
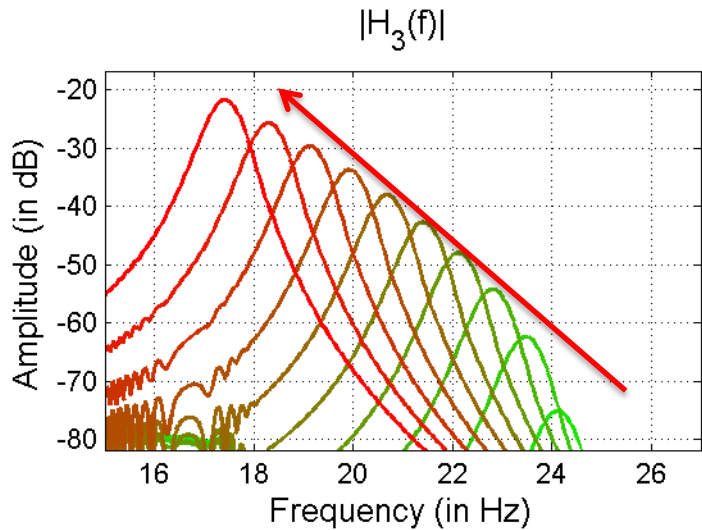
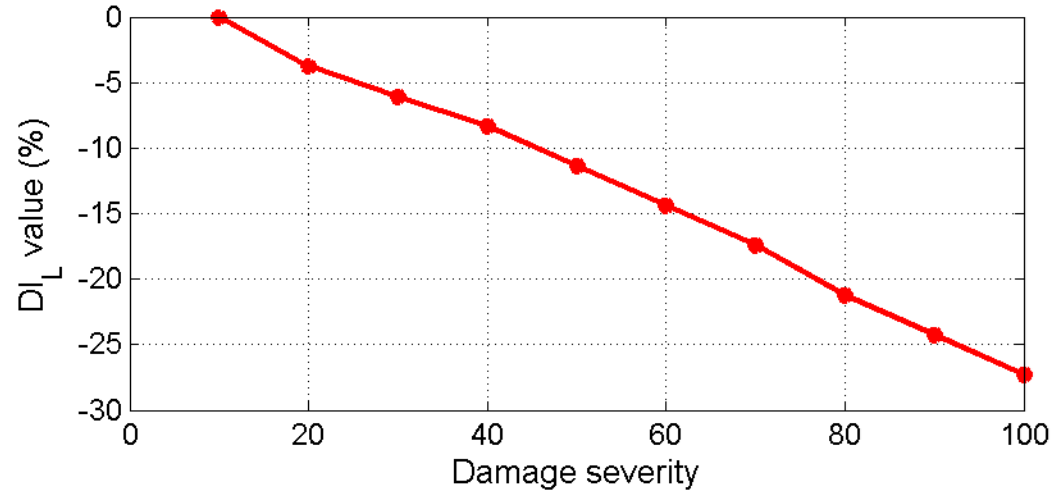
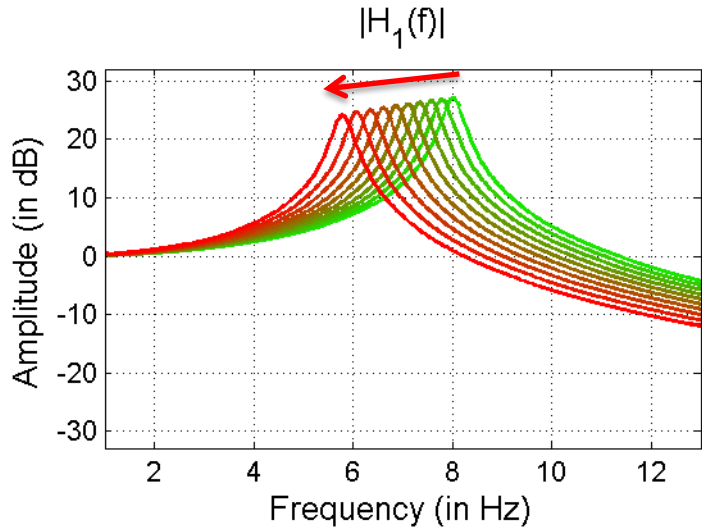
II.b) Quantification de dommages

Résultats de simulation



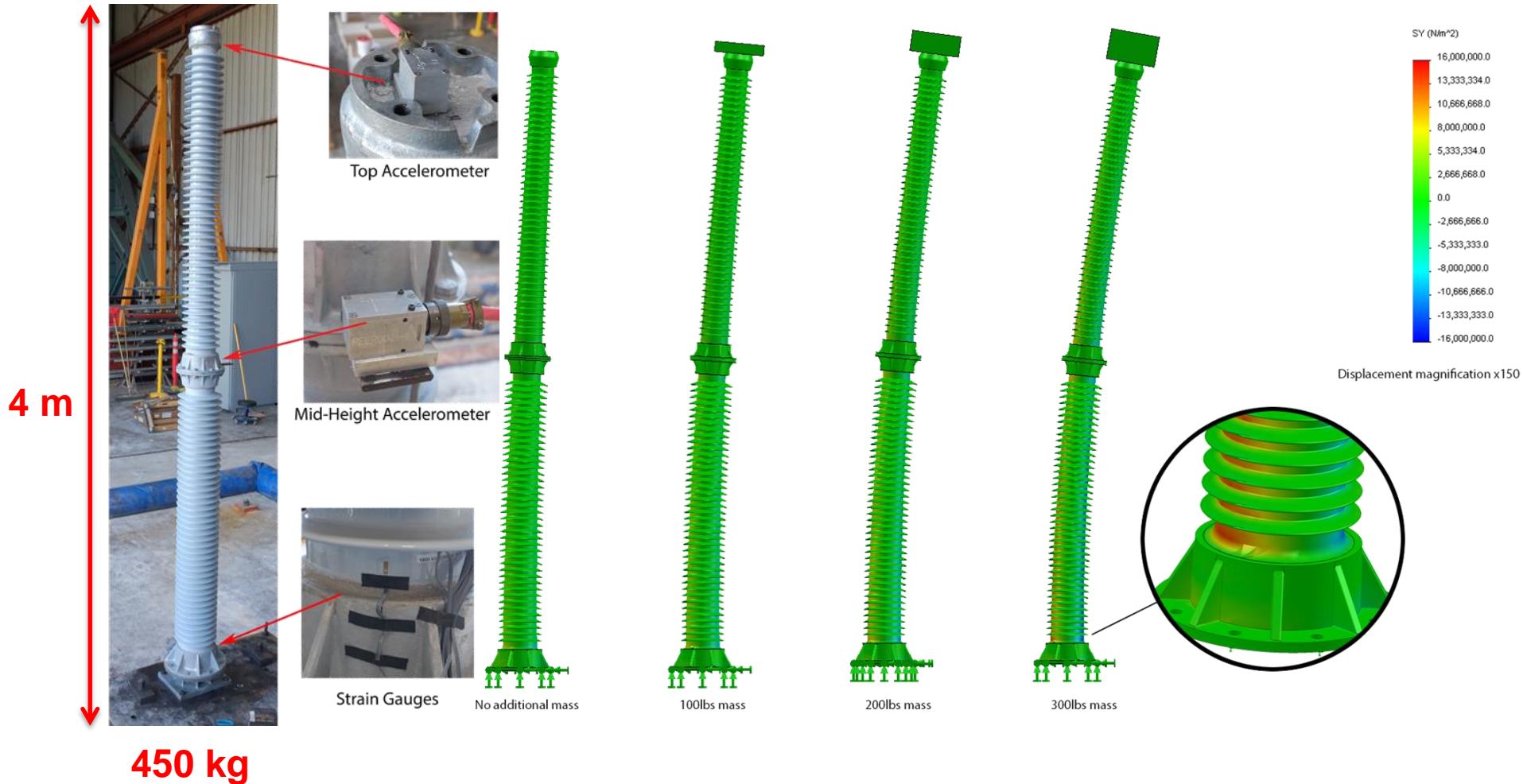
II.b) Quantification de dommages

Résultats de simulation



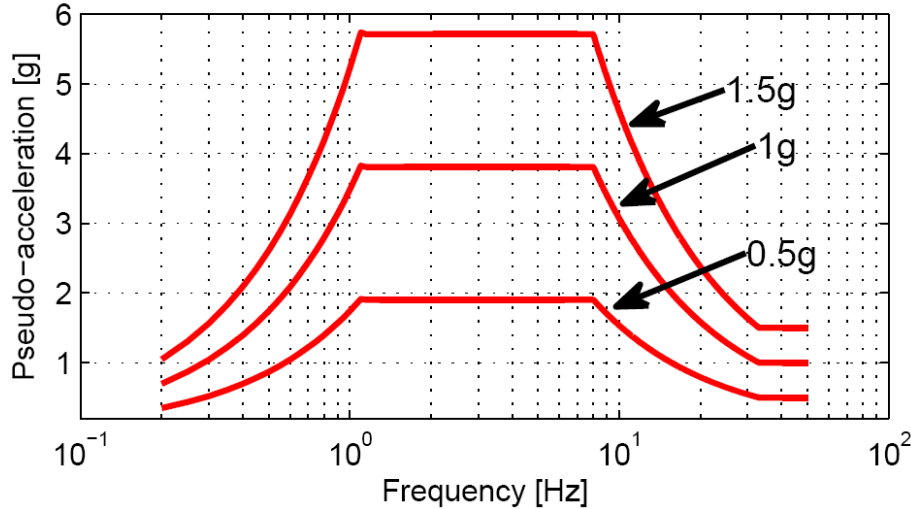
II.b) Quantification de dommages

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

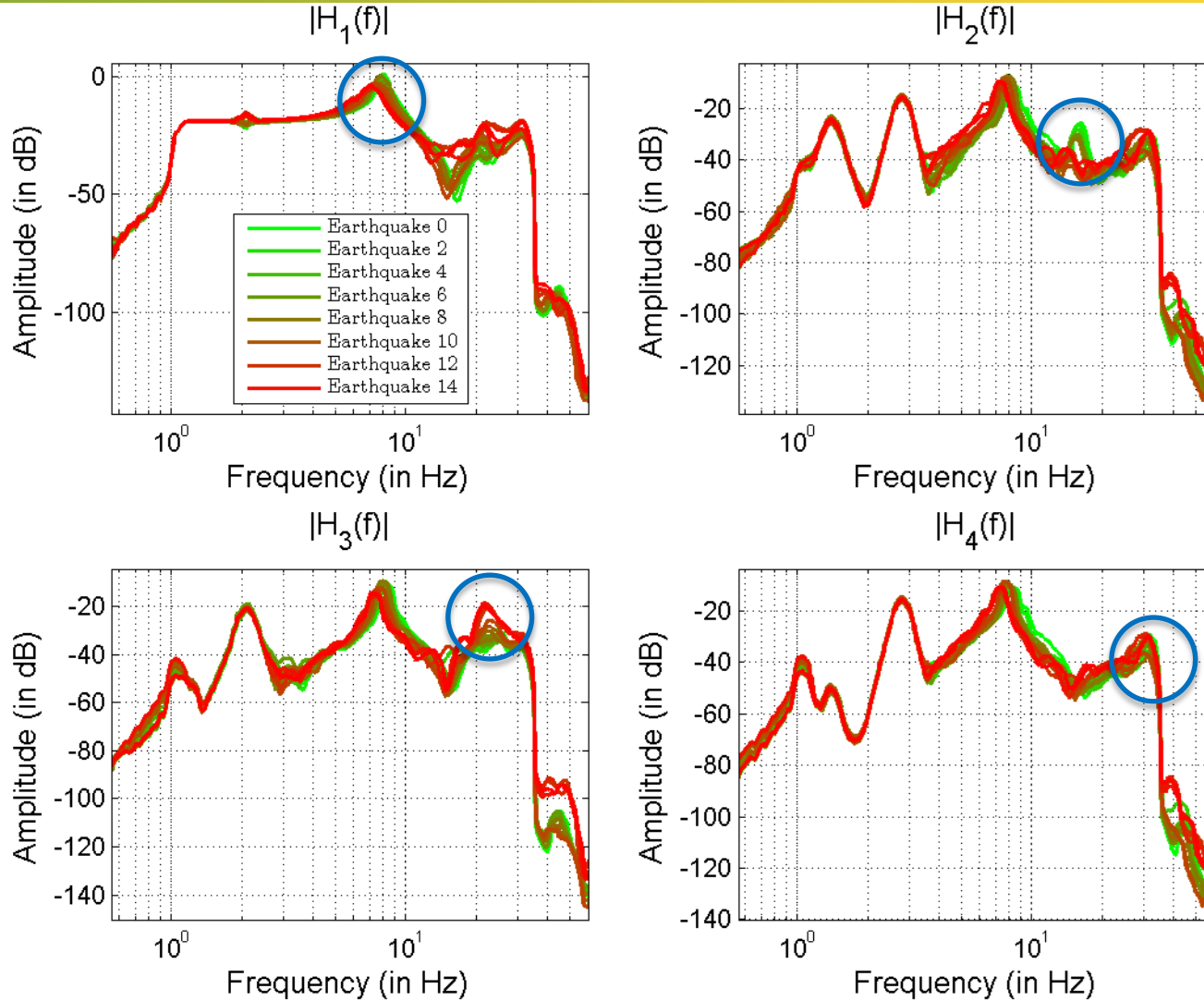
Clément B. Barthes
Khalid M. Mosalam

PEER, University of California Berkeley, CA, USA

4 m

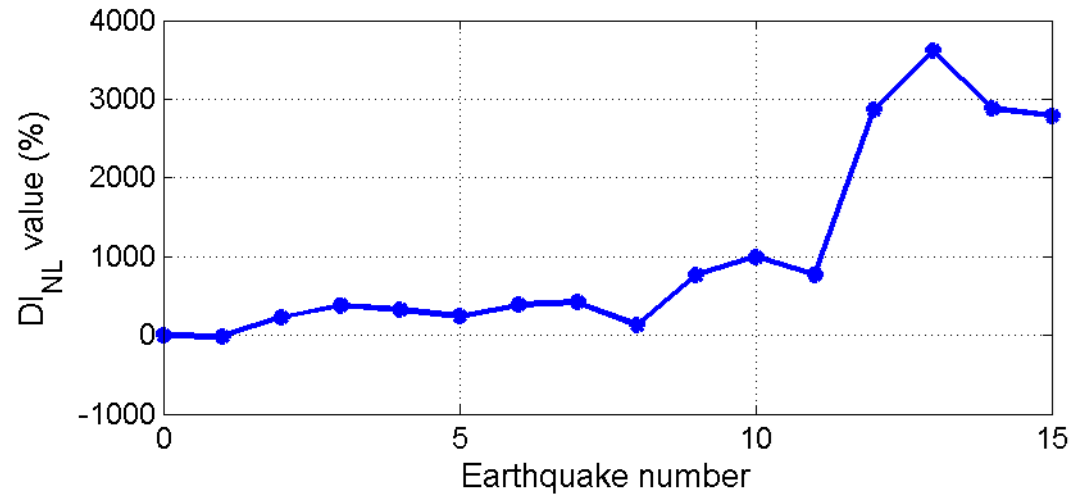
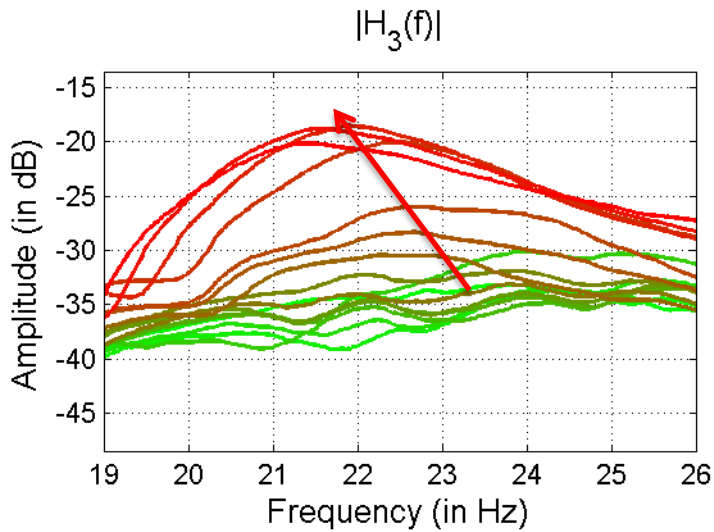
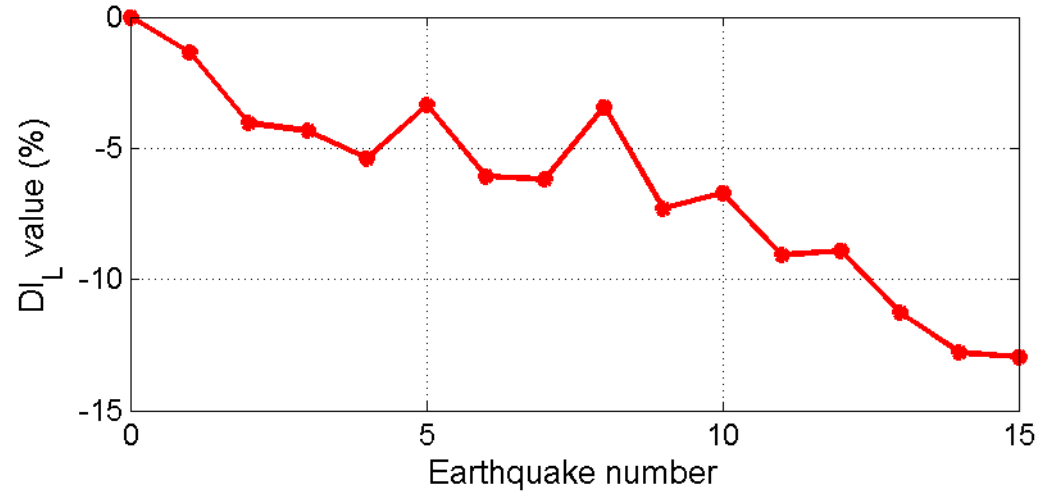
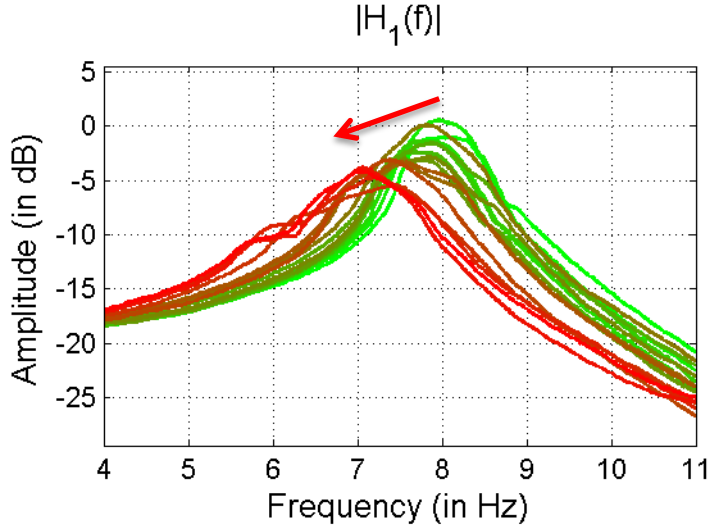
II.b) Quantification de dommages

Résultats expérimentaux



II.b) Quantification de dommages

Résultats expérimentaux



I) Les modèles de Hammerstein en parallèle

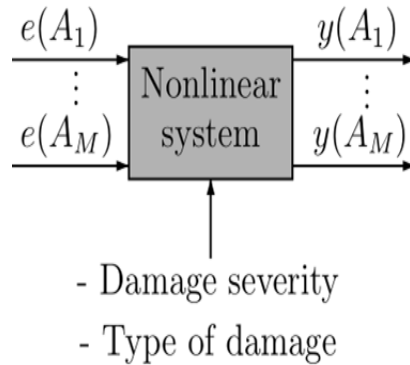
- a) Qu'est-ce que c'est?
- b) Comment les estimer?

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...**

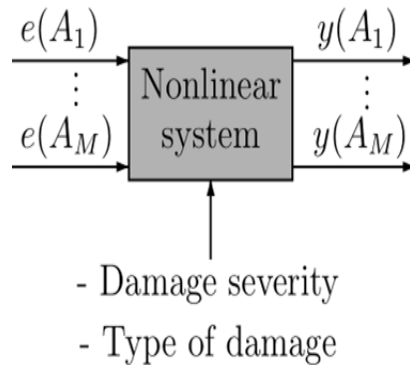
II.c) Vers la classification...

Structure endommagée à l'étude



II.c) Vers la classification...

Estimation d'un modèle non-linéaire

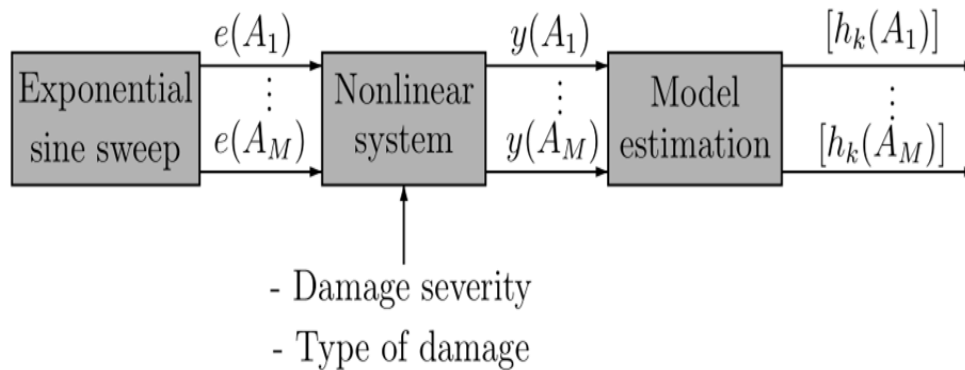


Procédure:

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

II.c) Vers la classification...

Estimation d'un modèle non-linéaire

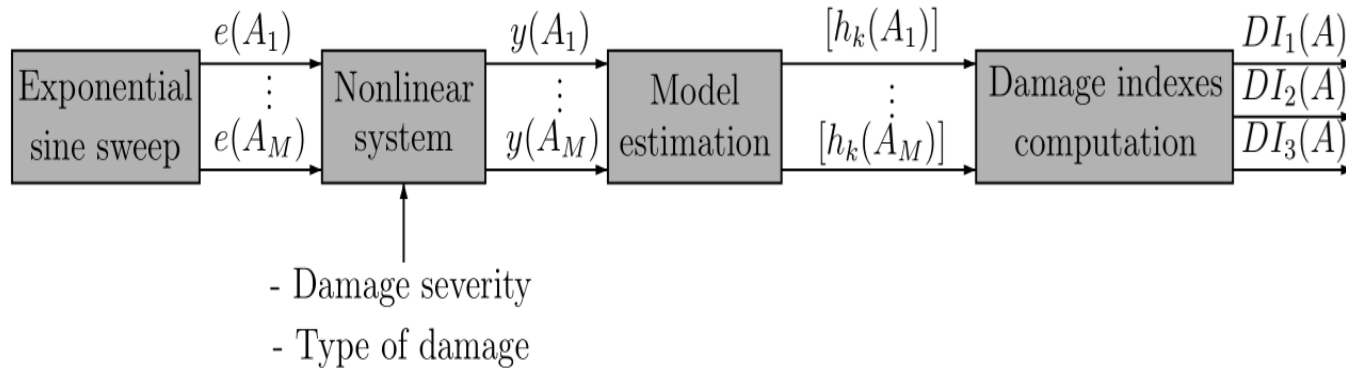


Procédure:

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

II.c) Vers la classification...

Calcul des indices d'endommagement

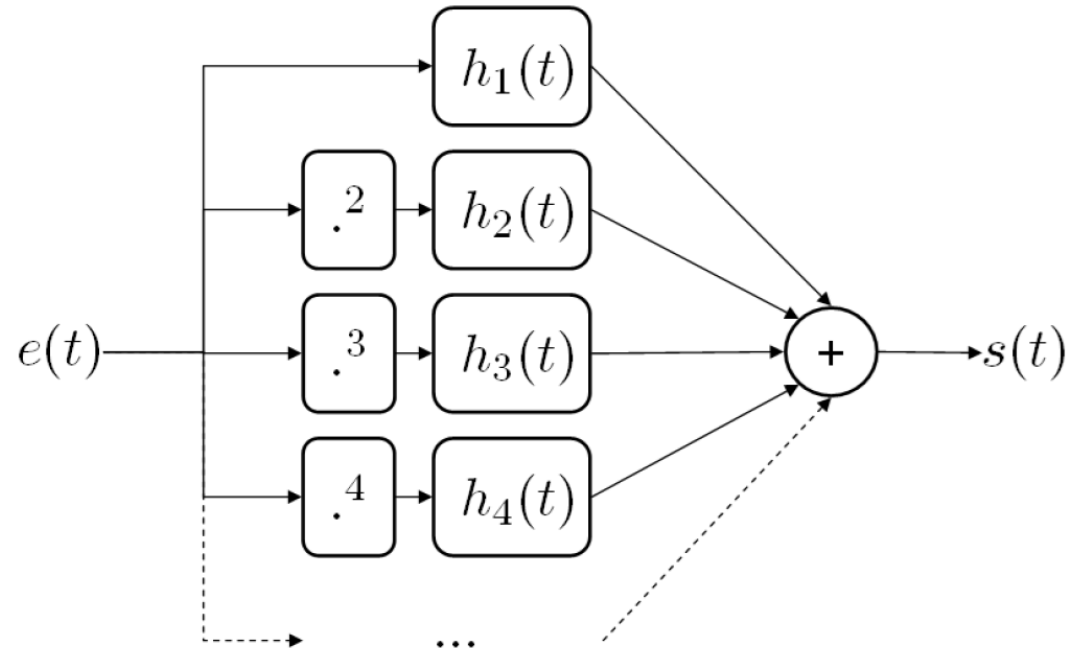


Procédure:

- 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



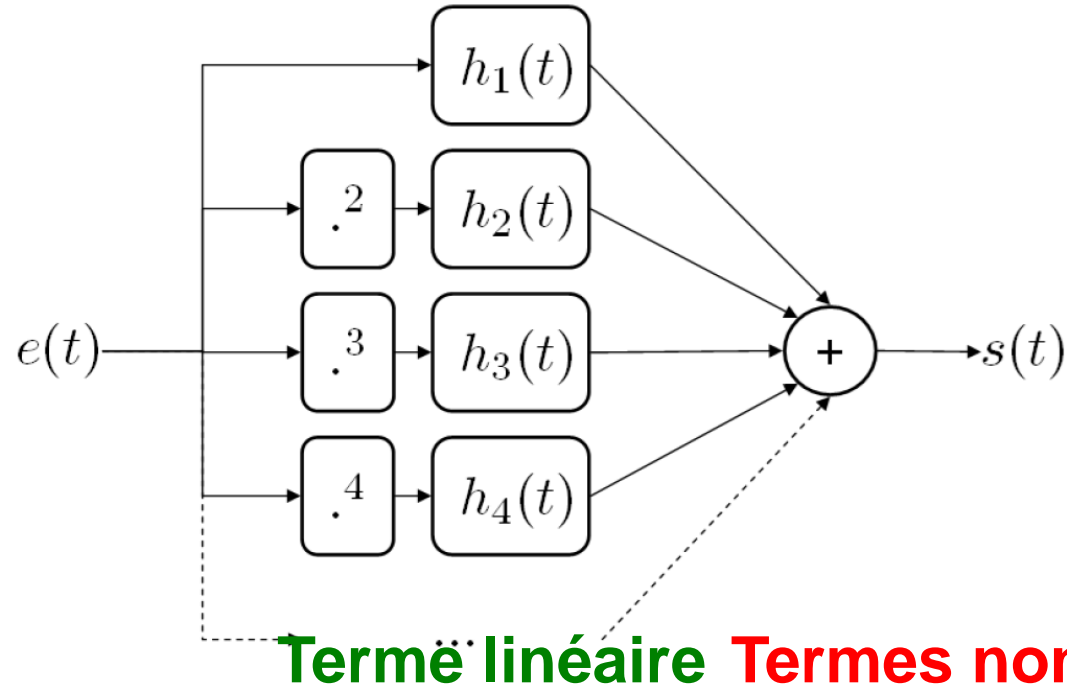
$$s(t) = s_L(t) + s_{NL}(t)$$

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:

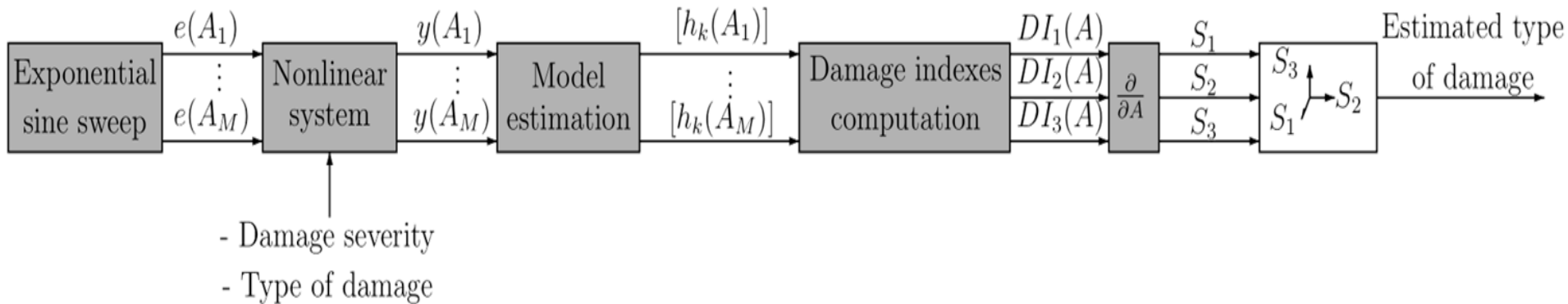
$$DI_2(A) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} |S_{NL}(A, f)|^2 df}{\int_{f_1}^{f_2} |S_L(A, f)|^2 df}$$

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

- 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

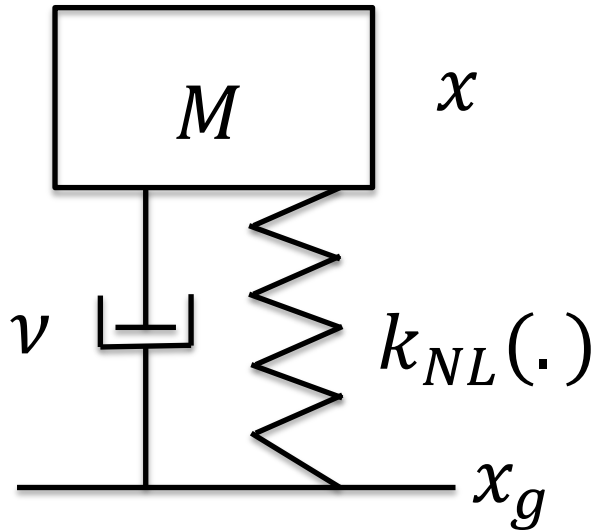


Procédure:

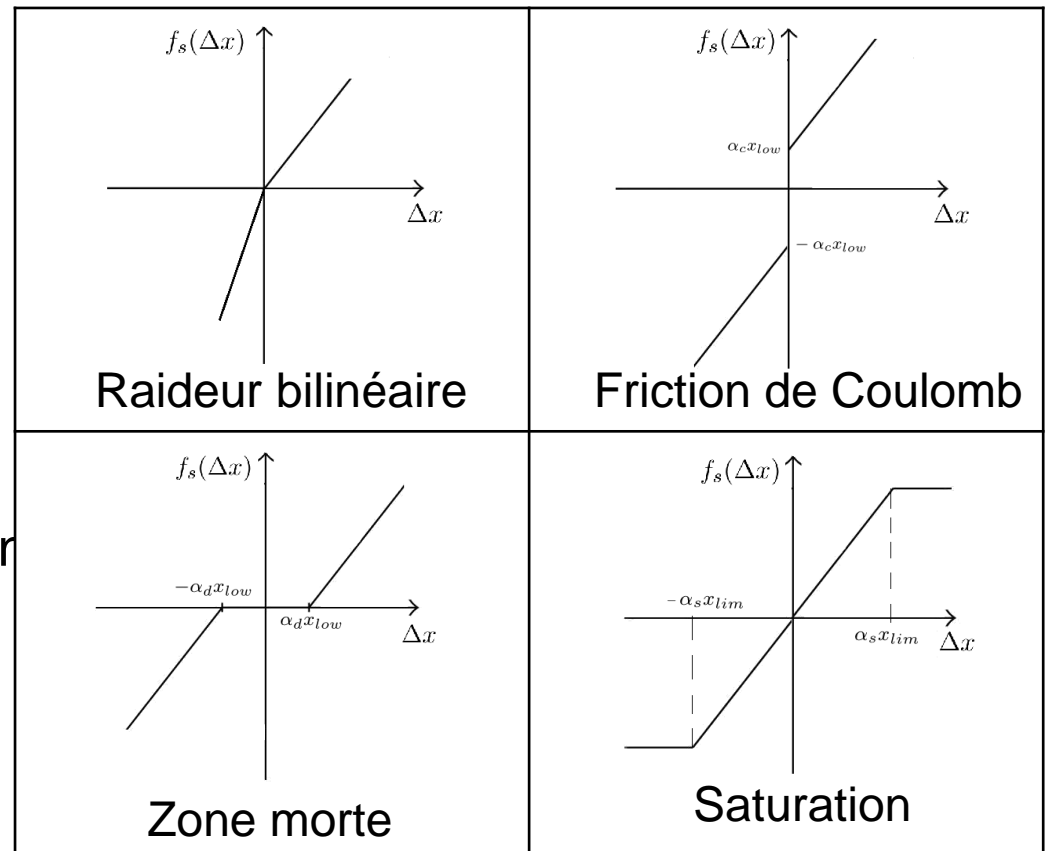
- 1) Estimation d'un **modèle non-linéaire** à différentes amplitudes
- 2) Calcul des **indices d'endommagement** à différentes amplitudes
- 3) Calcul de la **pente** des indices avec l'amplitude A
- 4) Estimation du type de dommage le plus probable (**classification**)

II.c) Vers la classification...

Structure endommagée simulée



☐ Dommages simulés par différentes raideurs non-linéaires



☐ Paramètres

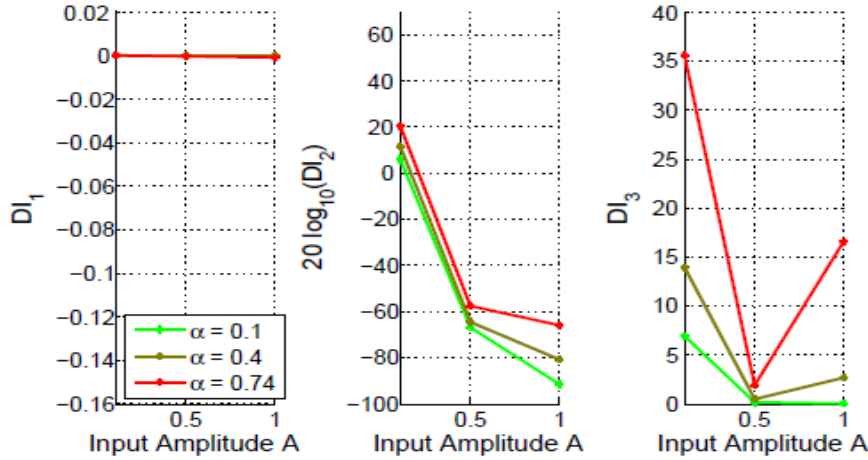
$M = 450 \text{ kg}$, $k = 1.2 \times 10^6 \text{ N/m}$

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

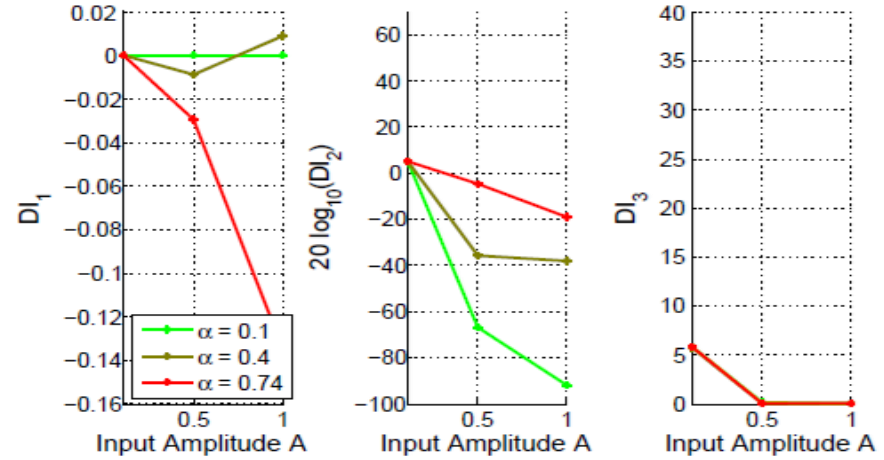
- $f_1 = 0.7 \text{ Hz}$
- $f_2 = 50 \text{ Hz}$
- $T = 364 \text{ s}$
- $f_s = 4 \text{ kHz}$

II.c) Vers la classification...

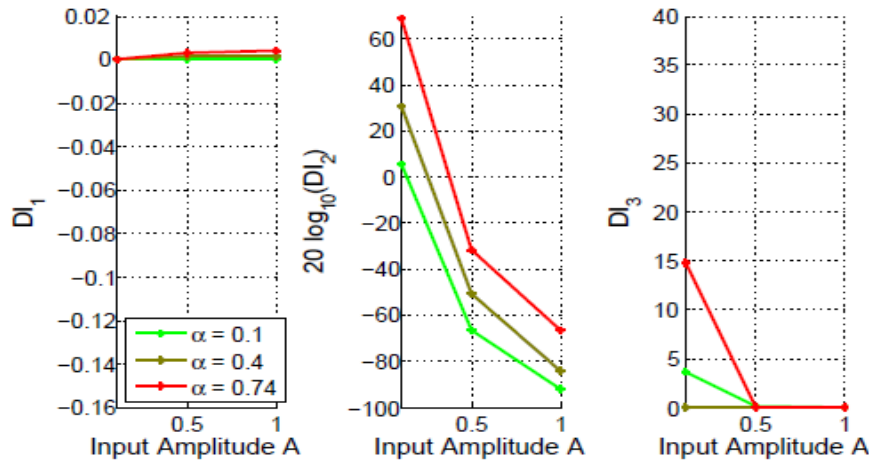
Evolution des indices avec l'amplitude A



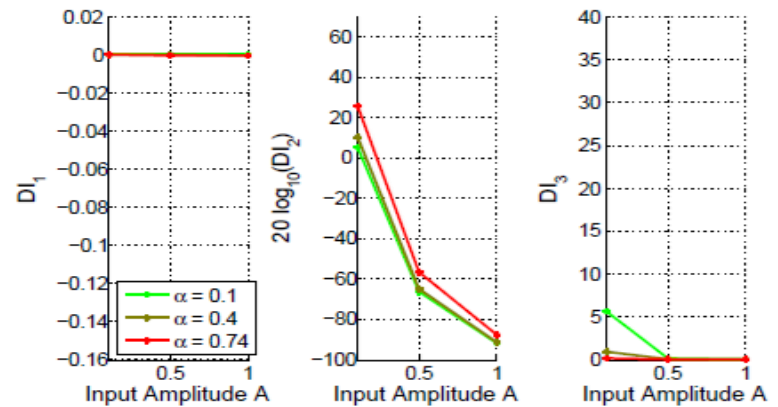
(a) Bilinear stiffness



(b) Saturation



(c) Dead zone

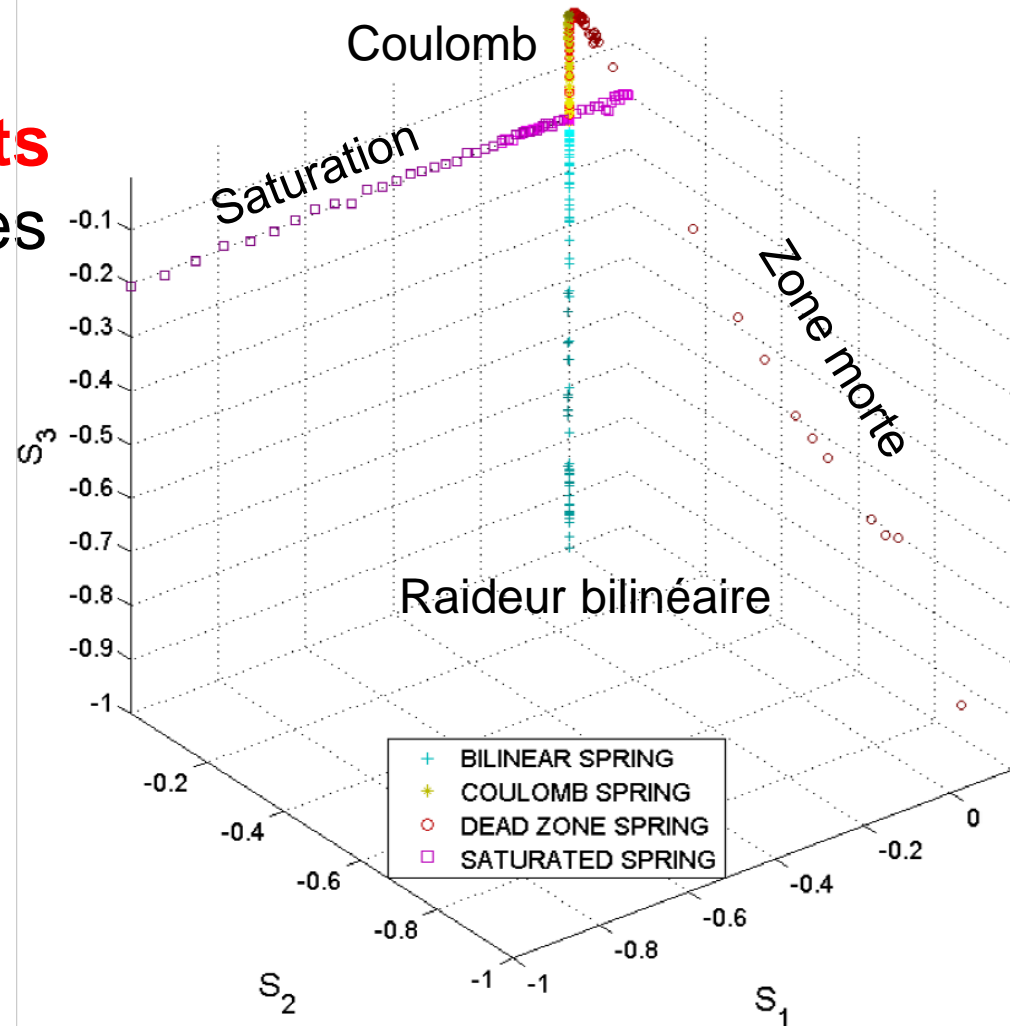


(d) Coulomb friction

II.c) Vers la classification...

Espace de classification 3D

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

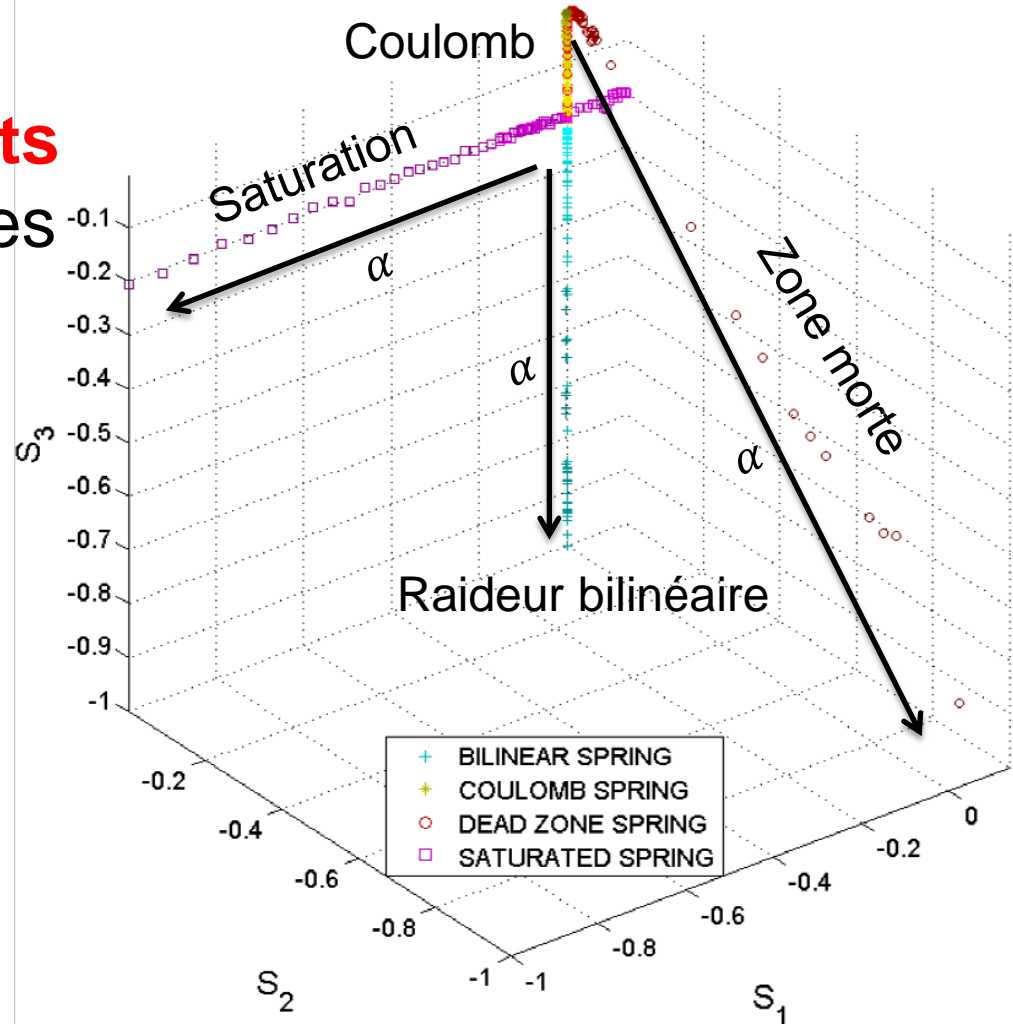


II.c) Vers la classification...

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

