

Approche système pour la surveillance vibratoire et le dimensionnement de structures

JOSEPH MORLIER (ISAE ET ICA)

ISAE - Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

ICA - Institut Clément Ader



Université de Toulouse, ED MEGEP

Plan

- 1 **Activités d'E/C**
- 2 **Enjeux et problématiques**
- 3 **Modèles, Mesures et Analyses**
 - Modèles structuraux/endommagements
 - Problème inverse
 - Analyse de données
- 4 **Etudes originales**
 - Modèles réduits en dimensionnement de structures
 - Identification d'un impact sur panneaux composites
- 5 **Conclusions et +**

Plan

- 1 **Activités d'E/C**
- 2 **Enjeux et problématiques**
- 3 **Modèles, Mesures et Analyses**
 - Modèles structuraux/endommagements
 - Problème inverse
 - Analyse de données
- 4 **Etudes originales**
 - Modèles réduits en dimensionnement de structures
 - Identification d'un impact sur panneaux composites
- 5 **Conclusions et +**

Activités d'E/C

Depuis ma thèse en 2005

- ATER à l'IUT Mesures Physiques (Bordeaux 1) [stage de recherche au LIAMA]
- Enseignant-chercheur ISAE et ICA depuis novembre 2006

Professeur Associé ISAE

Responsabilités administratives :

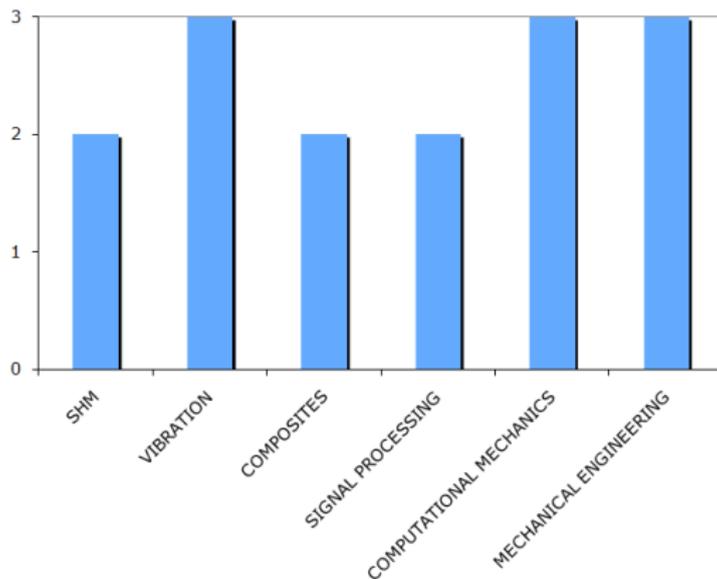
- Approfondissement 3ème année STRUCTURES (septembre 2007)
- Unité de Formation "SM" (septembre 2010)
- Co-Responsable 2ème année Formation SUPAERO (SEMESTRE 4 depuis janvier 2012)

Enseignements :

- 80H dans des modules de Mécanique et de Mathématiques appliquées
- Co-Responsable de 3 modules "DFS" et de 2 modules "DFM"

Mécanique ET Traitement du Signal

- **2006** MCF en section CNU 60 (Mécanique)
- **2009** MCF en section CNU 61 (Traitement du Signal)



Sujets de recherche

Encadrement de plusieurs doctorants/IR/Postdoctorants/stagiaires

- 1 Traitement des signaux vibratoires et Reconnaissance de formes pour l'identification d'impacts sur matériaux composites [SHM] **Amir Shahdin**, Hanno Niemann, Mauricio Maues, Olivier Cherrier
- 2 Identification modale [SysId] **Amhed Jinaoui**, Boris Cherman, Mauricio Maues, David Ramos
- 3 Outils d'optimisation pour le dimensionnement rapide [OP] **Dimitri Bettebghor**, Ali Jibawi, Fransisco Habbib et Erick Lima
- 4 Modélisation Multiphysique [MP] **Fazila Zawawi**, Pierre Selva, Ronny Chung

Plan

- 1 Activités d'E/C
- 2 Enjeux et problématiques**
- 3 Modèles, Mesures et Analyses
 - Modèles structuraux/endommagements
 - Problème inverse
 - Analyse de données
- 4 Etudes originales
 - Modèles réduits en dimensionnement de structures
 - Identification d'un impact sur panneaux composites
- 5 Conclusions et +

Surveillance de l'intégrité des structures (SHM)



FIGURE: Radiographie d'une luxation de l'annulaire de la main gauche d'après [Morlier, Urgences Toulouse 2012]

Surveillance de l'intégrité des structures (SHM)

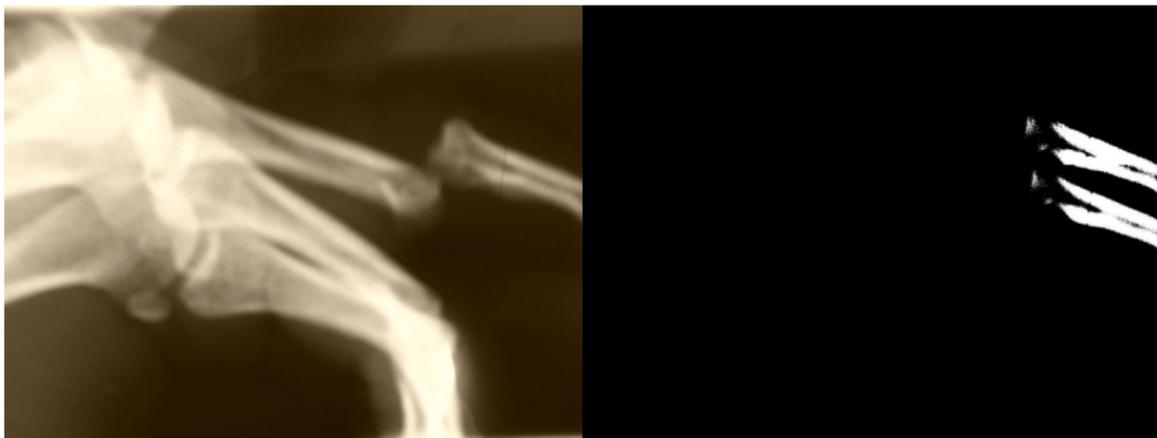


FIGURE: Surveillance vibratoire : comparaison entre deux états

Surveillance de l'intégrité des structures (SHM)



FIGURE: Effet de l'échantillonnage et du bruit de mesures sur les données brutes

Surveillance de l'intégrité des structures (SHM)

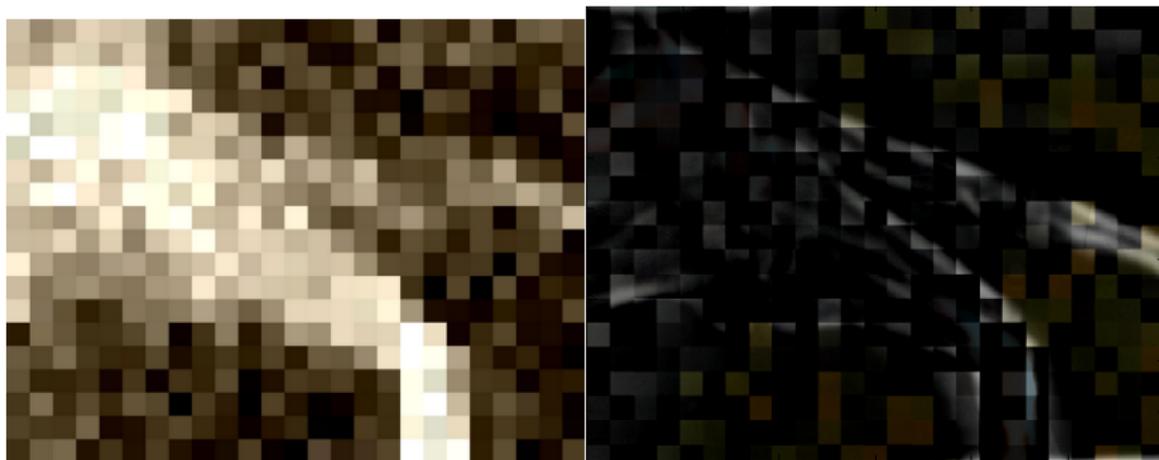


FIGURE: L'utilisation de données 'incertaines' conduit souvent à la détection de faux endommagements

Surveillance de l'intégrité des structures (SHM)

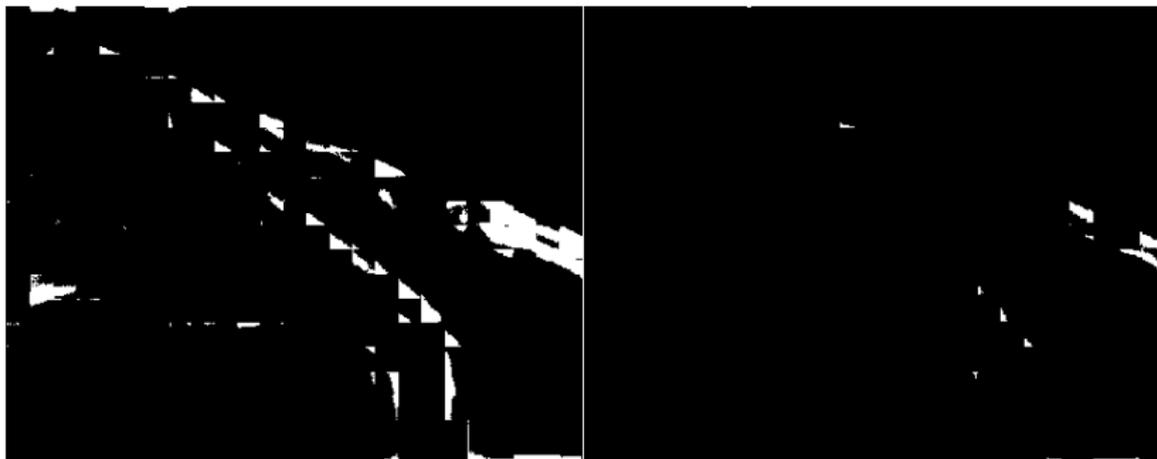


FIGURE: Des traitements classiques (threshold) permettent d'éliminer beaucoup de faux endommagements

'Offline' versus 'Online'

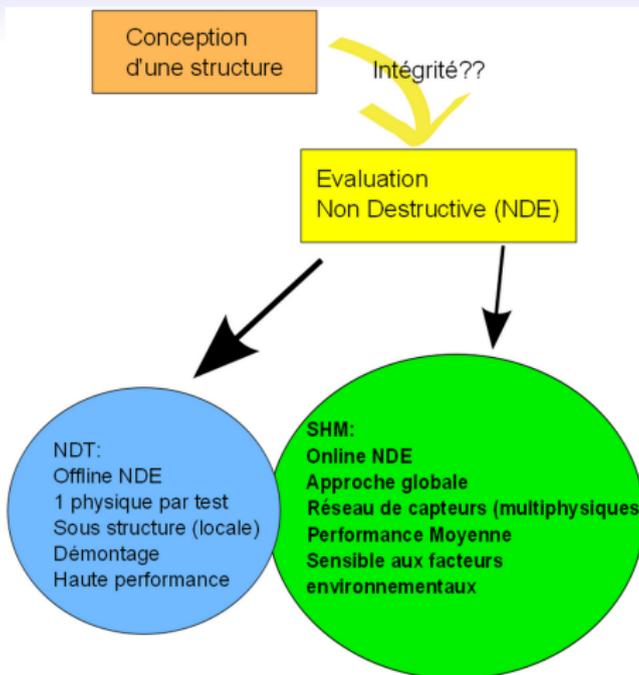


FIGURE: d'après [Adams, 2007]

Optimisation et 'SHM'

Concevoir une structure d'une manière optimale c'est :

- Réduire la masse, les coûts, le temps de calcul,...mais c'est aussi le choix optimal d'un matériau (Développement Durable) etc...
- Prévoir/comprendre les interactions entre domaines : 'MDO'
- **mais** c'est aussi concevoir un système mécanique optimisé intégrant les outils de surveillance (capteurs optiques, piezo embarqués, ou 'MEMS'...) pour détecter/localiser/quantifier les endommagements [et faire un pronostic]

Optimisation, statistiques, plans d'experiences

⇒ 'Getting More and Better for Less'

Zoom sur : Structures aéronautiques

Pour les matériaux composites (stratifiés), un type d'endommagement est largement étudié : le délaminage

- pour des impacts basses énergies ('birdstrikes', 'icestrikes'...) ou des problèmes de maintenance (impacts d'outils)
- est non visible en surface ('BVID')
- réduit la résistance de manière significative
- mais change les caractéristiques dynamiques : le '**monitoring**' est possible

En dynamique de structures, l'optimisation permet de résoudre certains problèmes :

- 1 Placement optimal des capteurs/ actionneurs (maximisation de l'information)
- 2 Identification modale robuste (estimateurs et incertitudes)
- 3 Localisation et identification des endommagements (classification)

Détectabilité

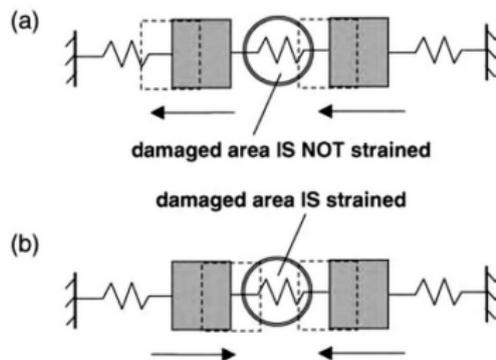


FIGURE: d'après [Adams, 2007]

DéTECTABILITÉ

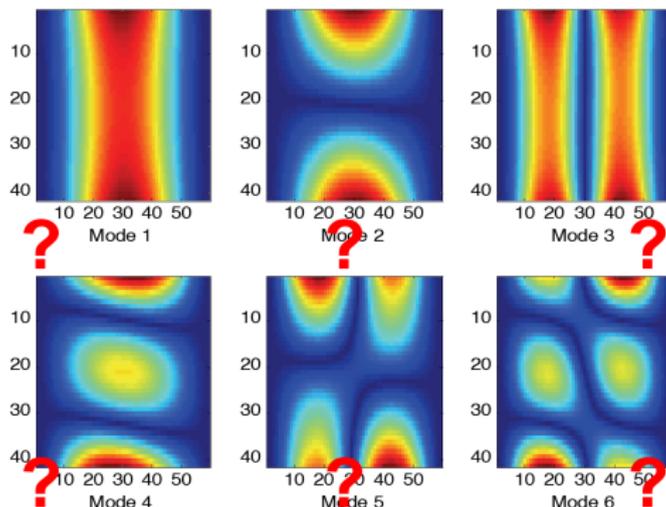
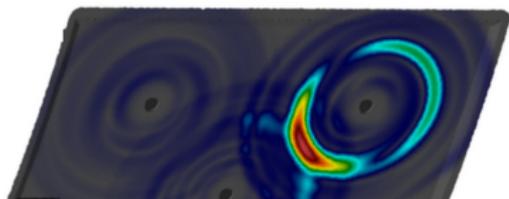


FIGURE: Certains critères permettent de discriminer les modes sensibles aux endommagements [Morlier et al,IMAC 2012 :C14]

Carte d'endommagement

Données ondes vibratoires [Morlier et al, IMAC 2012 :C14], données ondes guidées (Projet SAPES)



Plan

- 1 Activités d'E/C
- 2 Enjeux et problématiques
- 3 Modèles, Mesures et Analyses**
 - Modèles structuraux/endommagements
 - Problème inverse
 - Analyse de données
- 4 Etudes originales
 - Modèles réduits en dimensionnement de structures
 - Identification d'un impact sur panneaux composites
- 5 Conclusions et +

Sensibilité des FRFs (1/3)

$$H(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{1}{-m\omega^2 + cj\omega + k}$$

$$\frac{\partial H(j\omega)}{\partial k} = \frac{1}{(-m\omega^2 + cj\omega + k)^2} = -H^2(j\omega)$$

$$\frac{\Delta H(j\omega)}{\Delta k} \approx -H^2(j\omega)$$

avec $\Delta H(j\omega) = H_2(j\omega) - H_1(j\omega)$ et $\Delta k = K_2 - K_1$

En suivi d'intégrité de structures :

H_1 est la référence (ou baseline)

H_2 l'état actuel de la structure

Sensibilité des FRFs (2/3)

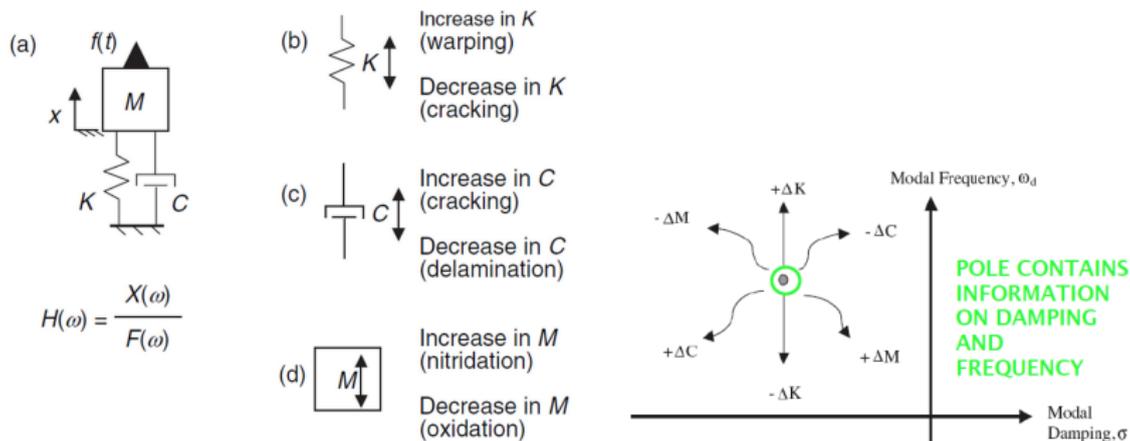


FIGURE: Modèles d'endommagement [Adams, 2007] et principe du "pole shift" appliqué à la détection du délaminage des composites [Shahdin et al SHM 2009, 2011, JSV 2010 : A5, A11, A12]

Sensibilité des FRFs (2/3)

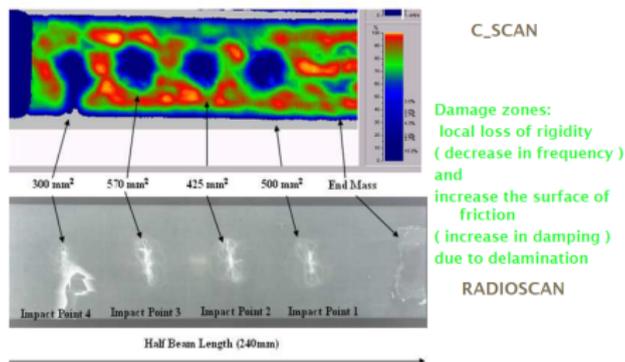


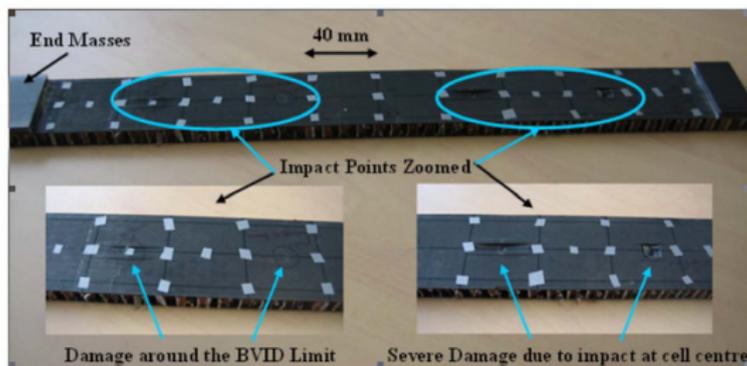
FIGURE: Résultats de *CND* pour une éprouvette impactée

SHM : Détection de changements : Fréquences propres, Transmissibilité, déformées, taux d'amortissement, etc...

Quel indicateur est le plus sensible ?

On discrimine les effets environnementaux (dits globaux, sur tous les modes) des endommagements localisés (dits locaux)

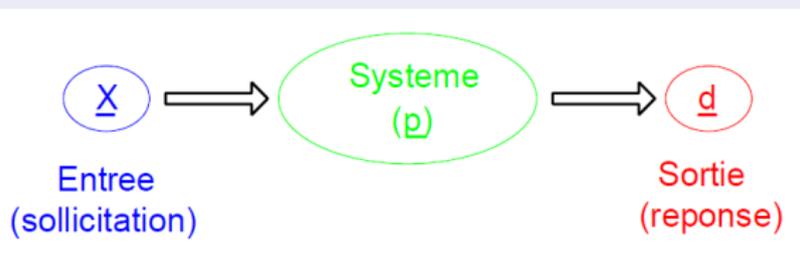
Sensibilité des FRFs (3/3)



On observe aussi un comportement non linéaire [Shahdin et al, JSV 2010 : A11] \implies GFRF, NOFRF, Séries de Volterra, Spectres d'ordre supérieur, Harmonic Balance etc...

Problème inverse (1/7)

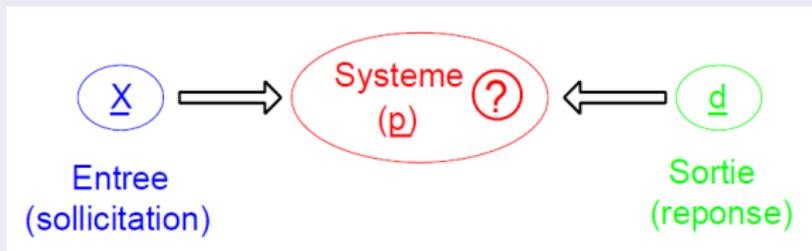
Evaluation d'une certaine grandeur physique \mathbf{p} inaccessible à partir de la mesure d'une autre grandeur \mathbf{d} directement accessible
Connaissant un modèle mathématique du problème direct qui donne explicitement \mathbf{d} à partir de \mathbf{p} ; ce que l'on note symboliquement $\mathbf{d} = \mathbf{g}(\mathbf{p})$ ou implicitement $\mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{d}) = 0$.



Problème inverse (2/7)

L'inversion est souvent reformulée comme une minimisation d'une fonction coût J (et donc un problème d'optimisation en norme L_2)

$$p^* = \operatorname{argmin}(J(p)), J(p) = \|d(p; X) - d^{obs}\|$$



Problème inverse (2/7)

L'inversion est souvent reformulée comme une minimisation d'une fonction coût J (et donc un problème d'optimisation en norme L_2)

$$p^* = \operatorname{argmin}(J(p)), J(p) = \|d(p; X) - d^{obs}\|$$

$$\begin{bmatrix} -\omega_i^2 X(\omega_i) & j\omega_i X(\omega_i) & X(\omega_i) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{k} \end{Bmatrix} = \mathbf{F}(\omega_i), \quad i = 1, \dots, N_f$$

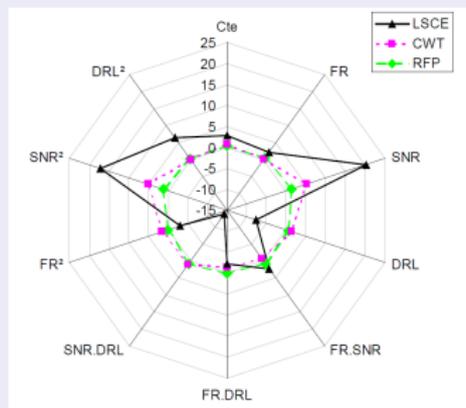
$$\{\theta\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{k} \end{Bmatrix}, \quad [\mathbf{A}]_c = \begin{bmatrix} -\omega_1^2 X(\omega_1) & j\omega_1 X(\omega_1) & X(\omega_1) \\ -\omega_2^2 X(\omega_2) & j\omega_2 X(\omega_2) & X(\omega_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\omega_{N_f}^2 X(\omega_{N_f}) & j\omega_{N_f} X(\omega_{N_f}) & X(\omega_{N_f}) \end{bmatrix}, \quad \{\mathbf{b}\}_c = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}(\omega_1) \\ \mathbf{F}(\omega_2) \\ \vdots \\ \mathbf{F}(\omega_{N_f}) \end{Bmatrix}$$

$$\{\theta\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{k} \end{Bmatrix}, \quad [\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} \operatorname{Re}[\mathbf{A}]_c \\ \operatorname{Im}[\mathbf{A}]_c \end{bmatrix}, \quad \{\mathbf{b}\} = \begin{Bmatrix} \operatorname{Re}\{\mathbf{b}\}_c \\ \operatorname{Im}\{\mathbf{b}\}_c \end{Bmatrix}$$

$$\{\hat{\theta}\}_{LS} = ([\mathbf{A}]^T [\mathbf{A}])^{-1} [\mathbf{A}] \{\mathbf{b}\} = \operatorname{pinv}([\mathbf{A}]) \{\mathbf{b}\} = \mathbf{A} \setminus \mathbf{b}$$

Exemple en identification modale (3/7)

Le bruit, pourtant faible, dégrade la qualité de la reconstruction. Cette forte dépendance aux données imprécises (incertitudes) a été mis en évidence dans l'estimation des taux d'amortissement. [Morlier et al, IMAC 2009 :C1]



⇒ Multiple-Input : structures complexes, éviter comportement NL, apporter de l'énergie

⇒ Multiple-Output : Mesures simultanées qui permettent d'améliorer la cohérence des données

Exemple en identification modale (4/7)

- Approche traditionnelle pour l'acquisition de données : théorème de *Shannon-Nyquist*.
- Compressive Sensing, 'CS' exploite le fait que de nombreux signaux réels peuvent s'exprimer de manière creuse et exploite aussi l'incohérence entre certains types de bases pour réduire ce nombre d'échantillons.
- Beaucoup de signaux naturels, lorsqu'ils sont exprimés dans une base particulière ψ_j , ont une représentation comportant de nombreux coefficients négligeables
⇒ compression de données

Compressive Sensing ou Minimisation L_1 (5/7)

Pour ce faire, il faut chercher, parmi toutes les solutions reproduisant les échantillons f obtenus, celle qui est la plus creuse. En faisant une optimisation sous contraintes on peut écrire :

$$\min \sum_{j=1}^N |a_j| \text{ respectant } \left\| f - \sum_{j=1}^N a_j \psi_j \right\| < \epsilon$$

En remplaçant la valeur absolue des a_j par la différence des parties positives et négatives, la fonction L_1 devient un objectif linéaire

Exemple 1D (6/7)

- $f(t)$ contient deux sinusoïdes, il est donc K creux ($K = 2$)
- bande $[0 - 10\text{Hz}]$ avec une résolution fréquentielle de 0.1Hz
- Reconstruction : 100 sinusoïdes minimum ($N=100$) et un ordre $M = K \log(N) = 9.2$ échantillons

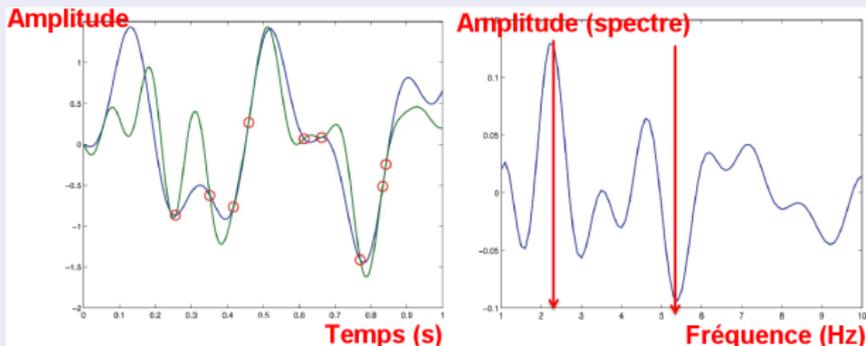


FIGURE: On aimerait retrouver sur le spectre DCT deux pics à 2.3 et 5.4 Hz

Exemple 1D (6/7)

- $f(t)$ contient deux sinusoïdes, il est donc K creux ($K = 2$)
- bande $[0 - 10\text{Hz}]$ avec une résolution fréquentielle de 0.1Hz
- Reconstruction : 100 sinusoïdes minimum ($N=100$) et un ordre $M = K \log(N) = 9.2$ échantillons

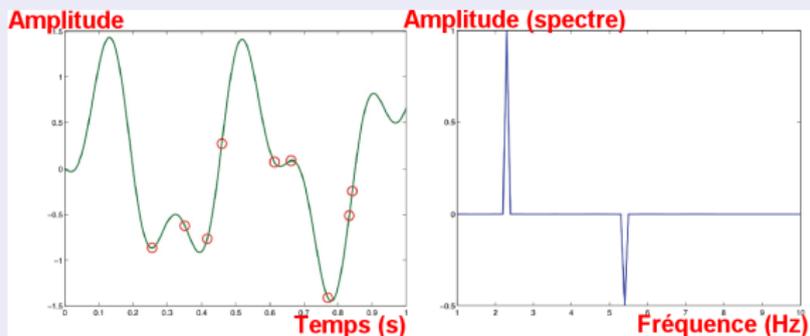


FIGURE: On a retrouvé sur le spectre DCT deux pics à 2.3 et 5.4 Hz \Rightarrow La minimisation L_1 concentre l'énergie du signal sur quelques coefficients non nuls alors que l'approche L_2 distribue l'énergie.

Application aux déformées modales (7/7)

[Morlier et Bettebghor, IMAC 2012 :C13]

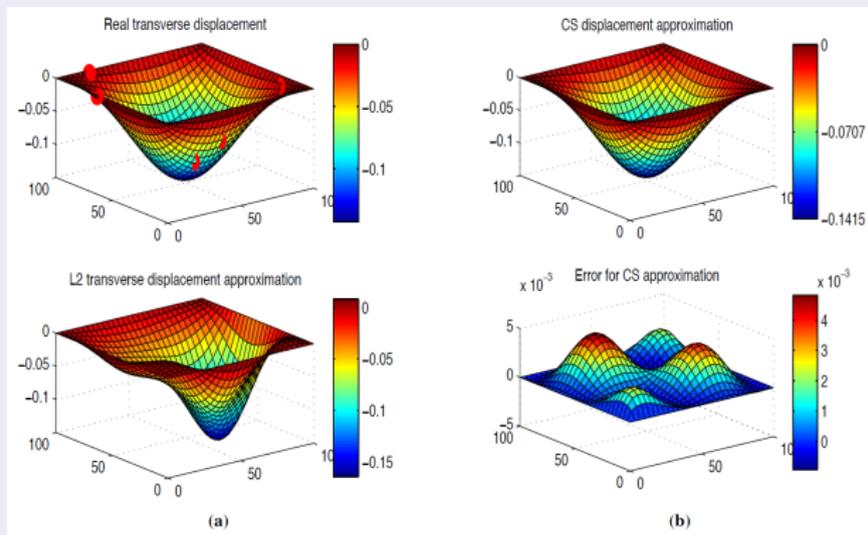


FIGURE: Reconstruction de déformée modale (Mode 1), avec 8 capteurs (placement aléatoire) et une base d'apprentissage 5×5 modes. Erreur L2 vs L1 (maximum de $5E - 3$)

Application aux déformées modales (7/7)

[Morlier et Bettebghor, IMAC 2012 :C13]

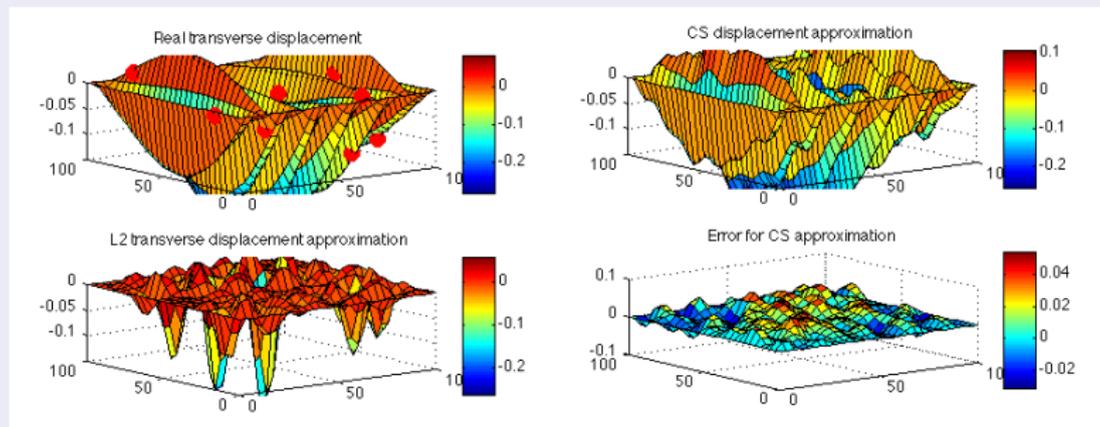
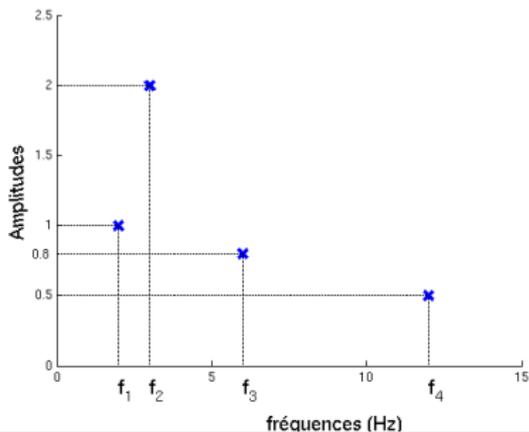
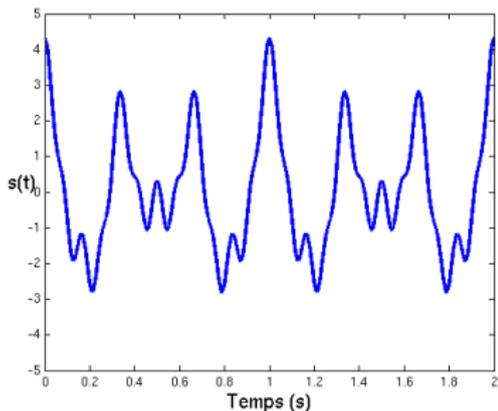


FIGURE: Reconstruction de déformée modale (Mode 9), avec 12 capteurs (placement aléatoire) et une base d'apprentissage 14x14 modes. Erreur L2 vs L1 (maximum de $4E - 2$)

mapping ou transformation intégrale (1/7)

Transformation des données originales (capteurs) apportant plus d'information que l'originale.

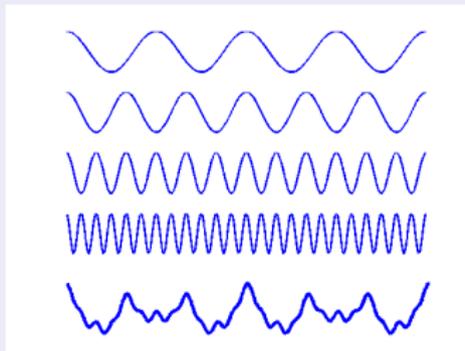
Inversibilité \Rightarrow Reconstruction avec peu de coefficients (les plus énergétiques en norme L_2 , les "meilleurs" en norme L_1)



Transformée de Fourier (2/7)

On effectue la comparaison du signal $x(t)$ avec une base de test $f_m(t)$ (base d'exponentielles complexes pour *Fourier*). Cette comparaison prend la forme d'une corrélation (produite par multiplication) moyennée (ou intégrée) sur la durée du signal.

$$X(m) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) f_m(t) dt$$



Base d'Ondelettes ou Temps-Fréquences (3/7)

Mapping définie par :

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt$$

où l'atome de base ψ est une fonction de moyenne nulle, centrée au voisinage de 0 et d'énergie finie. La famille de vecteurs est obtenue par translation et dilatation de l'atome de base : $\psi_{(u,s)} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right)$

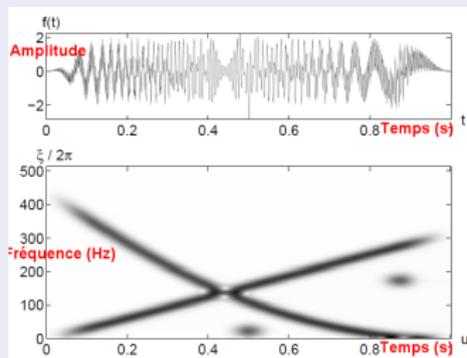


FIGURE: \Rightarrow Carte Temps/Fréquences [Mallat, 2000]

Application à la détection de singularités (4/7)

Mesures de déformées Haute Résolution (Polytec LDV)

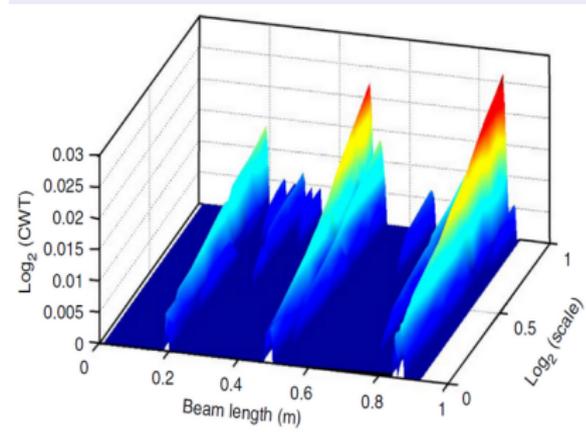
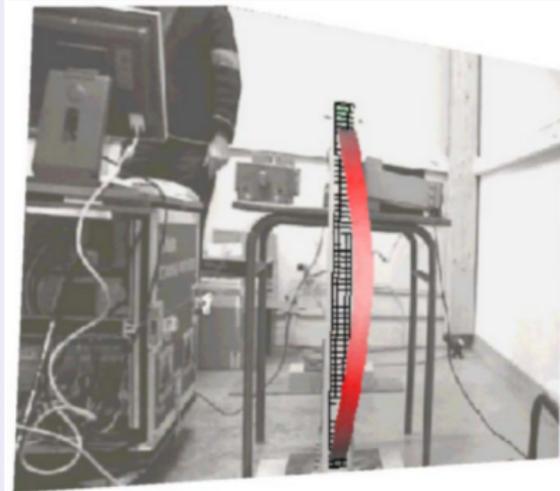


FIGURE: \Rightarrow Détection d'endommagements (singularités) [Morlier et al, JSV 2006 :A2]

Reconnaissance de formes (5/7)

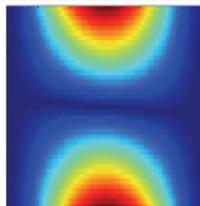
En général, l'opération de reconnaissance comprend 2 étapes :

- l'extraction de caractéristiques (ou de primitives) dont le but est de réduire la quantité de données et d'éviter l'explosion combinatoire
- la décision (ou le classement) qui consiste à associer une description symbolique à l'objet, sur la base de ses caractéristiques

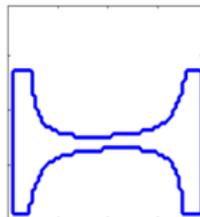
Les caractéristiques sont choisies de manière à ce qu'elles soient : semblables pour les formes d'une même classe et dissemblables pour des formes de classes différentes ⇒ **Descripteurs pertinents**

Exemple de RF (6/7)

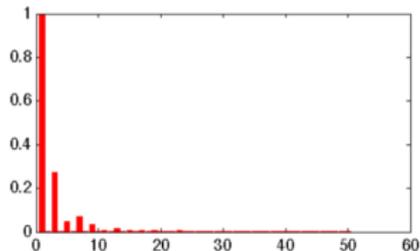
- Espace d'observation image
 - binaire 50 x 50 pixels
 - ~300 octets



- Espace de représentation
 - 3 segments
 - 24 octets



- Espace d'interprétation
 - code ascii
 - 1 octet



Exemple de RF (6/7)

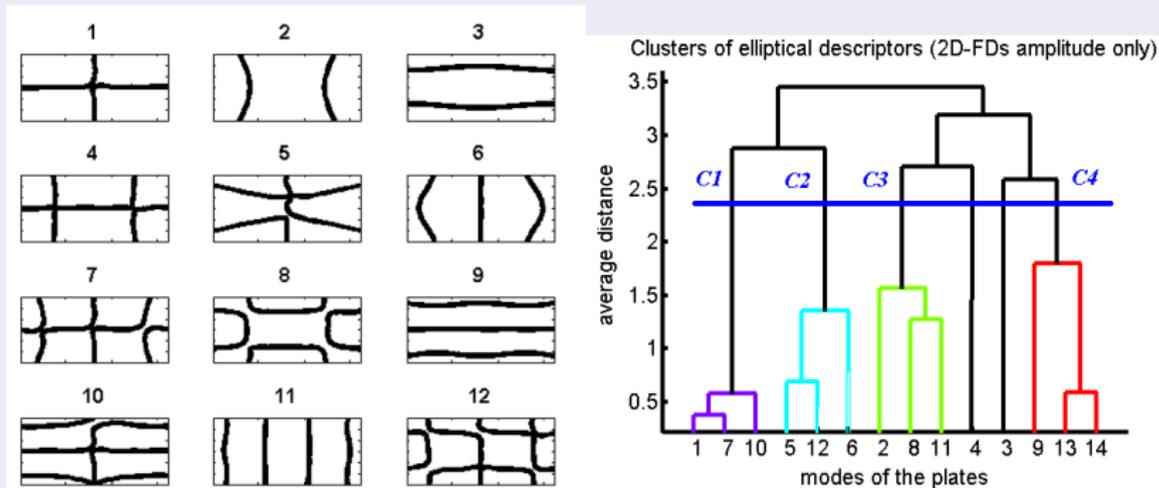


FIGURE: Exemple de lignes nodales sur une plaque *CFCF*, et clustering de déformées similaires (dendrogramme) [Wang et al MSSP 2009] à partir des descripteurs de *Fourier* elliptiques

Exemple de RF (6/7)

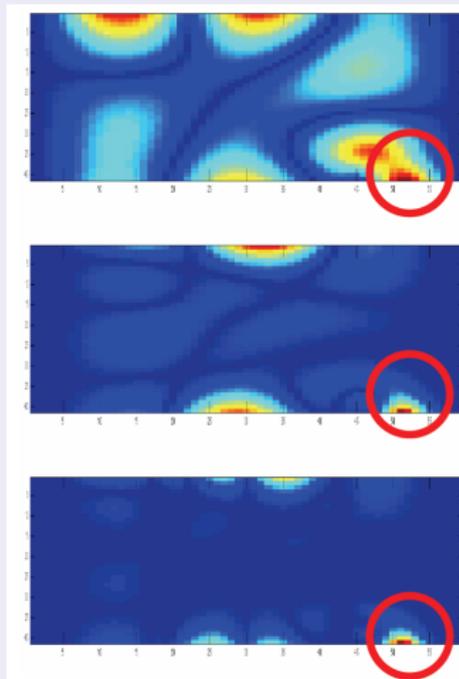
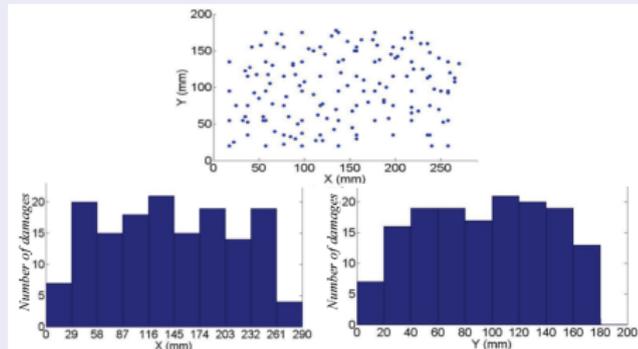
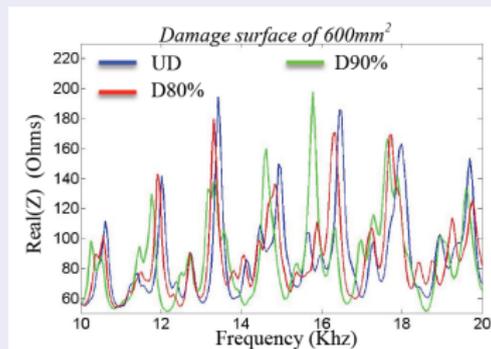


FIGURE: [Morlier, IMAC 2012 :C14] la sélection des descripteurs "sensibles" permet de discriminer les vrais endommagements

Classification supervisée ou non supervisée (7/7)

L'**apprentissage supervisé** où le système connaît les classes auxquelles appartiennent les échantillons d'apprentissage. Ex : base d'apprentissage de spectres EMI pour le diagnostic par RN [Selva et al, ICCS16]



L'**apprentissage non supervisé** où le système ne connaît pas ces classes. Ex : Optimisation composites [Bettebghor et al. IJSMO 2010 :A15] ⇒ **Clustering** : Comment comparer des éléments dispartes pour les rassembler ou au contraire les différencier ?

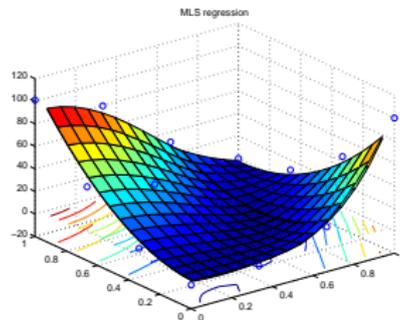
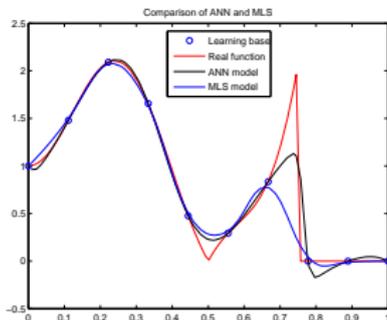
Plan

- 1 Activités d'E/C
- 2 Enjeux et problématiques
- 3 Modèles, Mesures et Analyses
 - Modèles structuraux/endommagements
 - Problème inverse
 - Analyse de données
- 4 **Etudes originales**
 - Modèles réduits en dimensionnement de structures
 - Identification d'un impact sur panneaux composites
- 5 Conclusions et +

Modèles réduits

Les **modèles réduits** (ou **métamodèles**, **surfaces de réponse**) sont un ensemble de techniques issues des statistiques et des probabilités visant à approcher une relation input/output ($Y = f(X)$) sur la seule connaissance de cette relation sur un échantillon $(x_i, y_i)_{i=1\dots n}$

- régression linéaire, polynomiale
- réseaux de neurones (*Multi Layer Perceptron*)
- krigeage
- machines à vecteurs supports (SVM)
- moindres carrés mobiles (MLS)
- MARS (*Multivariate Adaptive Regressive Splines*)...



Flambage panneaux composites

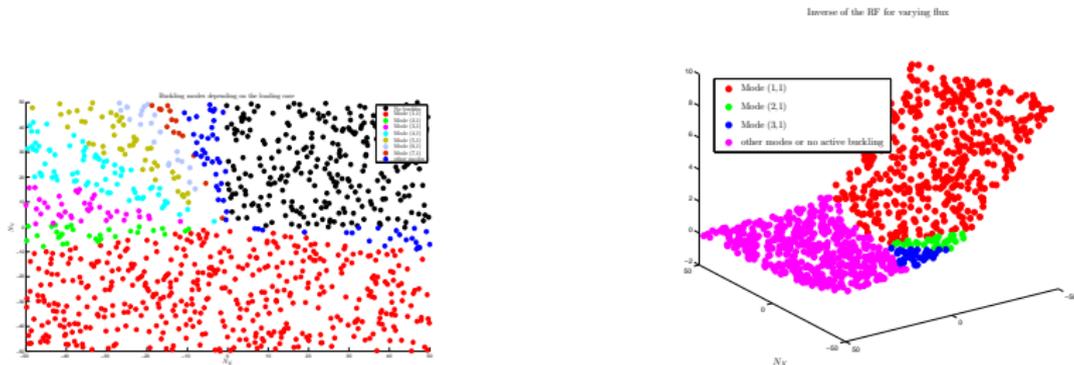


FIGURE: Modes actifs dans l'espace des chargements (N_X, N_Y) et Inverse du RF (N_X, N_Y)

⇒ Au sein d'une même région, la fonction semble être assez simple : L'idée est de **subdiviser** l'espace des entrées en autant de régions que de modes différents et d'entraîner un modèle réduit par région $F(X) = \sum_{i=1}^K \alpha_i(X) f_i(X)$

Mélange d'experts [Bettebghor et al. IJSMO 2010 :A15]

- Mélange d'experts : un modèle réduit par région. Les experts étant combinés en un expert global
- Repose sur un outil classique des Probabilités : l'**algorithme EM** (Expectation-Maximization)

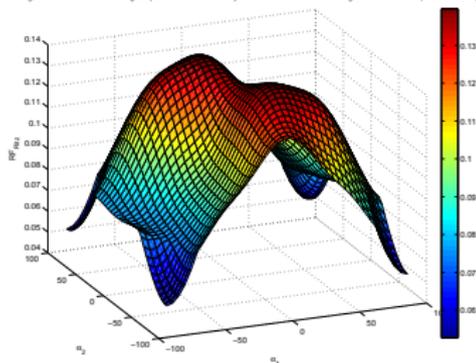
Plus précisément,

- **On divise automatiquement l'espace des entrées** en régions en appliquant un algorithme de partitionnement sur le couple entrées-sorties
- On entraîne un modèle réduit local (réseaux de neurones, kriging...) et on les combine en un expert global qui peut être continu ou discontinu

Modèle réduit d'un code de calcul

Panneau raidi droit composites avec variables de conception (dimensions géométriques et cas de charge) [Bettebghor et al. Giens 2011 :C12, IJSMO 2010 :A15]

tz skin buckling reserve factor for a rectangular plate made of a two-layer laminate vs. the first two angles of the laminate (uniaxial loading $N_x < 0$)



Data set

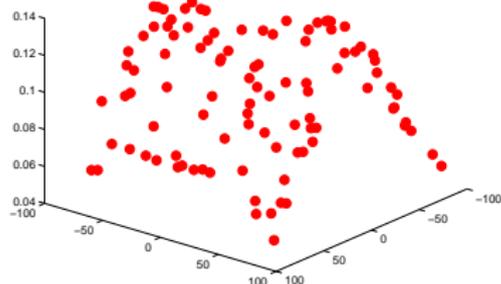


FIGURE: RF pour un stratifié $[\alpha_1/\alpha_2]$ pour une plaque carrée en compression simple. Les angles varient entre -90° et 90°

Modèle réduit d'un code de calcul

Panneau raidi droit composites avec variables de conception
(dimensions géométriques et cas de charge) [Bettebghor et al.
Giens 2011 :C12, IJSMO 2010 :A15]

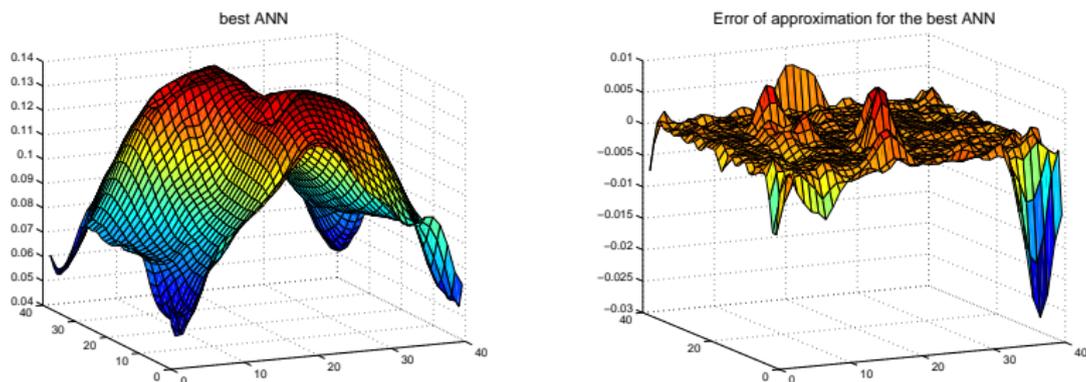


FIGURE: Meilleur réseau de neurones et erreur $\approx 10^{-2}$

Modèle réduit d'un code de calcul

Panneau raidi droit composites avec variables de conception
(dimensions géométriques et cas de charge) [Bettebghor et al.
Giens 2011 :C12, IJSMO 2010 :A15]

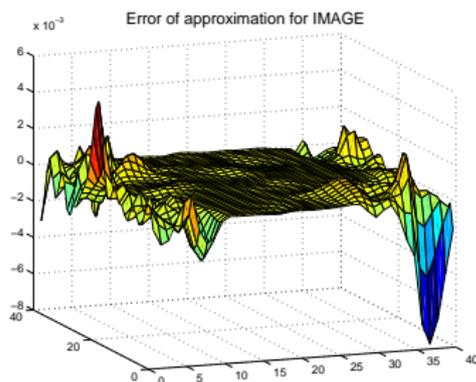
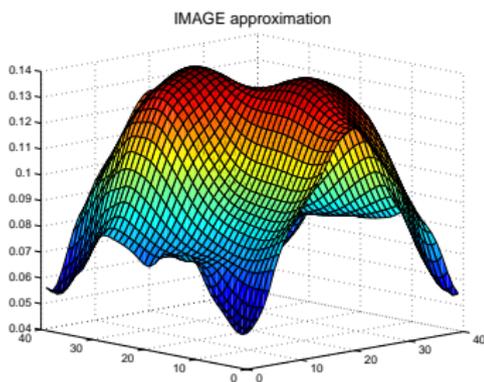


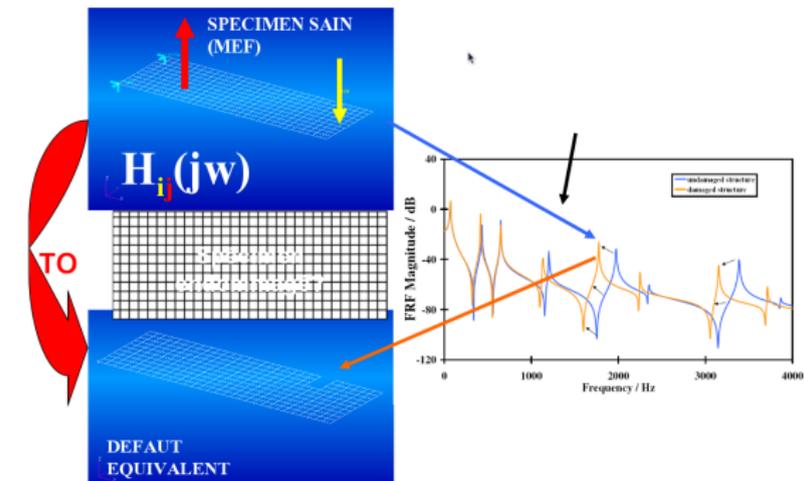
FIGURE: Mélange d'experts et erreur $\approx 10^{-3}$)

Le SHM est un domaine de recherche assez récent, il existe peu d'ouvrages de références. Dans un problème de localisation d'endommagement, on travaille en 3 étapes :

- 1 Identification des paramètres modaux = pseudo inverse [LMS Polymax, BK LSCE polyreference], ou paramètres 'EMI' [Giurgiutiu, 2008]
- 2 'Model updating' du specimen sain (et endommagé) [Selva et al, ICSS16 2011 :C12, Shahdin et al, SHM 2011 :A12]
- 3 'Monitoring'
 - Reconnaissance de formes [Selva et al, ICSS16 2011 :C12]
 - Traitement du signal [Morlier et al, JSV 2006 :A2, Projet SAPES]
 - **Optimisation [Niemann et al, MSSP 2010 :A10]**

Optimisation topologique

L'outil d'optimisation topologique estime un endommagement équivalent par minimisation de la différence entre un état supposé sain (modèle EF) et le spécimen endommagé



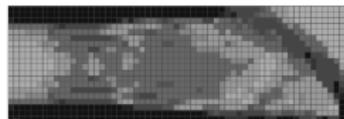
Principes de l'optimisation topologique

- Les variables de conception $\chi_e = \frac{\rho_e}{\rho_0}$ soumis à $0 \leq \chi_{min} \leq \chi \leq 1$.
- Mise à jour de la propriété E de l'élément pour altérer sa rigidité :
 $E_e = \chi_e^p E_0$

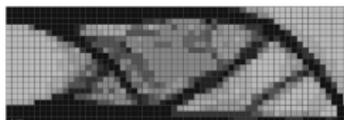
Utilisation classique (statique) : la recherche de la distribution optimale de masse dans la domaine de design en conservant une rigidité maximale (minimisation de la compliance à volume constant).



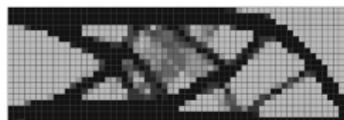
(a) 1 optimization cycle



(b) 6 optimization cycles



(c) 12 optimization cycles



(d) 20 optimization cycles

Applications à la détection de défauts

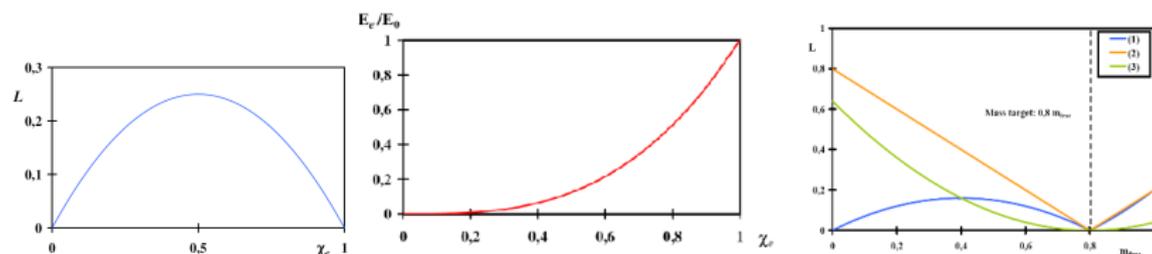
[Lee et al, JNE 2008]

$$\min_{\chi_e, \chi_{\min} \leq \chi_e \leq 1} L = \min_{\chi_e, \chi_{\min} \leq \chi_e \leq 1} \sum_{e=1}^{N_e} \chi_e (1 - \chi_e)$$

pour obtenir un résultat N&B (seuillage pour éliminer les valeurs intermédiaires)

Adaptation à une formulation pseudo-objective incluant

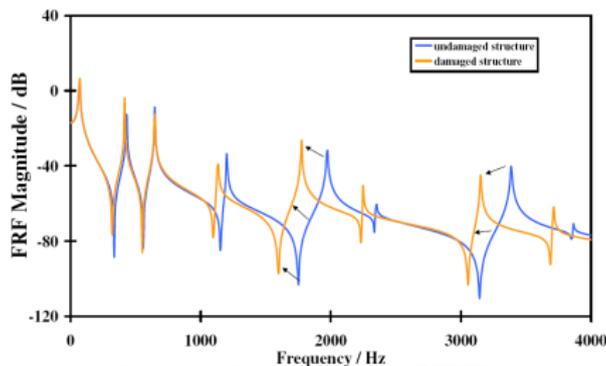
- 2 paramètres de pénalité sont utilisés $E_e = \chi_e^p E_0$ et $m_e = \chi_e^p m_0$
- Paramètres de masse cible à régler en fonction de l'endommagement



Applications à la détection de défauts

2 types de contraintes

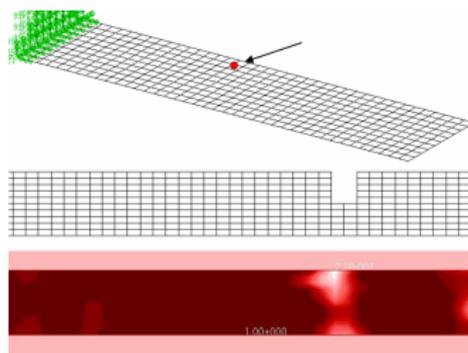
- Correspondance des fréquences $g_i^w = (w_i^2 - \bar{w}_i^2)^2$ pour $i = 1 \dots n$
- Correspondance des FRFs $g_j^H = (H_{kl}(\Omega) - \bar{H}_{kl}(\Omega))^2 \leq \epsilon_H$ pour $i = 1 \dots N$.



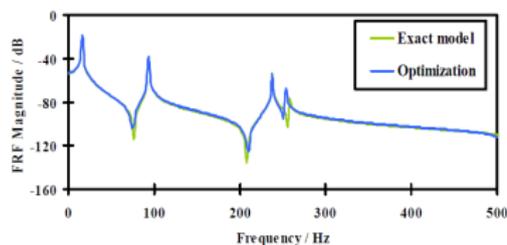
Nastran utilise la sensibilité du modèle "EF" pour trouver le gradient le plus important afin d'initialiser l'optimisation (premier élément altéré).

Résultats de simulation 2D

Recalage d'une FRF d'une poutre entaillée en ALUMINIUM

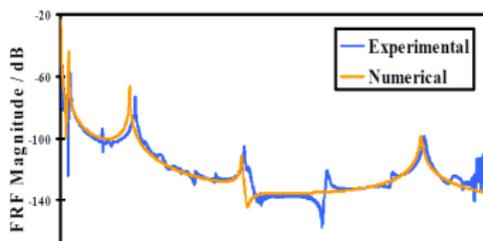
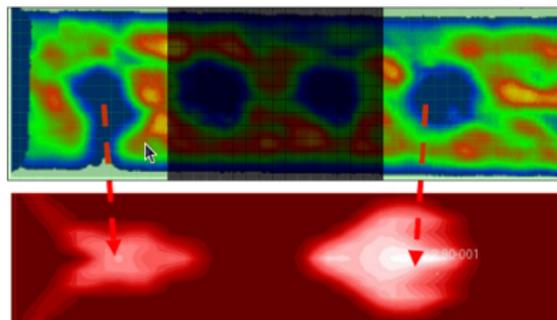


Mode	Natural Frequencies / Hz	
	Model	Optimization
1	16	16
2	94	94
3	238	238
4	256	254
5	257	257



Résultats sur des mesures [Niemann et al. MSSP 2010]

Composite stratifié homogénéisé : comparaison avec les résultats C-scan avec 2 impacts

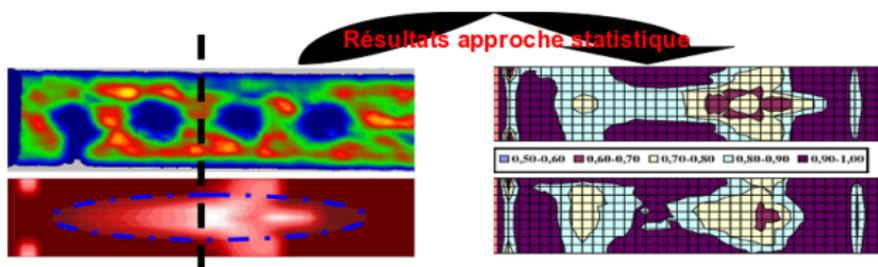


JOSEPH MORLIER (ISAE ET ICA)

Mode	Natural Frequencies / Hz	
	Model	Optimization
1 (1st bending)	36	30
2 (2nd bending)	157	148
3 (1st torsion)	279	259
4 (3rd bending)	687	679

HDR

Approche statistique



- Un résultat par capteur "virtuel" : Le résultat varie en fonction de la position du capteur
- Solutions envisagées : informations locales des déformées modales à prendre en compte

⇒ on varie aléatoirement la position, on calcule la FRF : La carte finale est la moyenne des résultats d'optimisation

Travaux en cours (SAPES)

Projet EPICEA, Partenaire Latecoere, Medysis Air et Espace

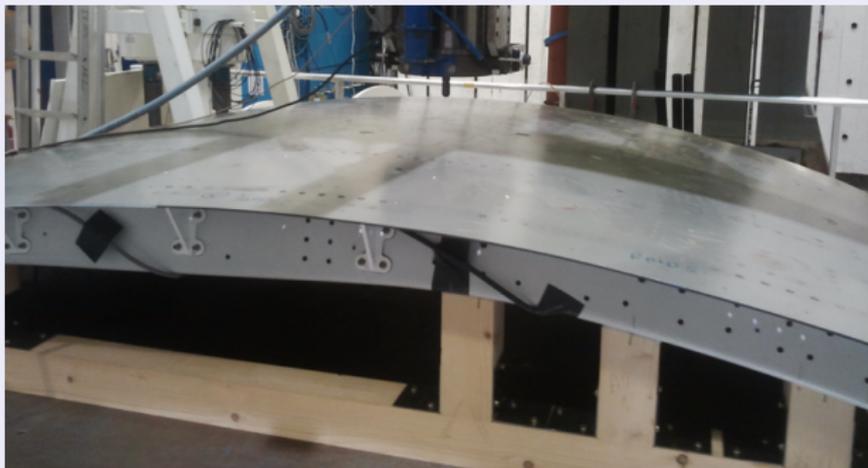


FIGURE: Essais d'impact et Mesures EMI

Travaux en cours (SAPES)

Projet EPICEA, Partenaire Latecoere, Medysis Air et Espace

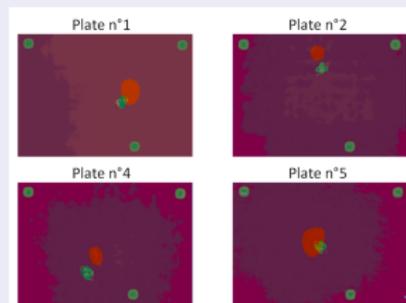
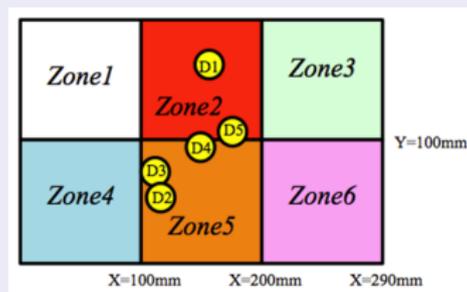


FIGURE: Classification probabiliste et cartes d'endommagement [Projet SAPES]

- Limites des approches ('model driven') supervisées dans le cas de plusieurs impacts successifs, beaucoup de données à générer pour l'apprentissage, recalage du modèle 'baseline'
- Limites des approches traitement du signal dues aux faux endommagements, placement des capteurs, excitation naturelle
- Possibilité d'approche 'data driven' (statistiques, type 'SHMtool') mais : gestion d'une quantité de données importante sans sens physique

Plan

- 1 **Activités d'E/C**
- 2 **Enjeux et problématiques**
- 3 **Modèles, Mesures et Analyses**
 - Modèles structuraux/endommagements
 - Problème inverse
 - Analyse de données
- 4 **Etudes originales**
 - Modèles réduits en dimensionnement de structures
 - Identification d'un impact sur panneaux composites
- 5 **Conclusions et +**

Conclusions

Bilan

- 15 articles, 15 conférences, 2 thèses soutenues, 1 projet EPICEA
- En cours : 2 thèses, 1 projet RTRA, 2 articles soumis (Selva et al, SHM ; Cherrier et al, JSV)

Approche système

- Développement d'outils innovants précieux dans le cadre nouveau d'une conception optimale plus globale ('MDO', 'SHM')
- Complémentarité des méthodes de surveillance basées sur les modèles/données
- Utilisation de modèles réduits en optimisation de structures composites et couplage fluide structure
- Algorithmes adaptables à l'optimisation robuste

Perspectives

- Ajouter des modèles évolués d'endommagement (F. Lachaud, ICA/MSc) ou des métamodèles d'endommagement en SHM
- Fusion de données de différentes physiques et discrimination statistique (M. Todd, Université de Californie San Diego)
- Analyse modale opérationnelle, FVT (T. Gouache, CORNIS)
- Mise à jour de modèles à partir de mesures 'DIC' (V. Wang, Université de Liverpool)
- Optimisation couplée fluide structure d'une aile flexible (Projet RTRA Osycap, Partenaires : ONERA, CERFACS, IMT)
- 2 Thèses CIFRE (SNECMA, EUROCOPTER)

What else ?

*L'environnement constitue un système. La société humaine constitue également un système. Ces systèmes coexistent et interagissent, faiblement à certains points de vue, fortement à d'autres. Lorsque deux systèmes déjà complexes interagissent, les conséquences sont difficiles à prévoir. L'une de ces conséquences a été l'impact destructeur de la société industrielle sur l'environnement et l'écosystème dans lequel nous vivons et dont nous dépendons...***Michael Ashby, Matériaux et environnement : Eco conception**