



## Comment mesurer les vibrations ?

F. Gautier, P. Picart, J.H. Thomas, C. Pezerat, M. Bentahar

22,23 mars 2011

Fédération Parisienne du Bâtiment  
Salle Prado  
10, rue du Débarcadère  
75017 Paris

Vibrations dans les bâtiments:

Sources, modes de propagation et techniques de réduction

# Pourquoi mesurer les vibrations ?

- Pour relever des niveaux d'accélération ou de forces transmises
  - observation, constat d'une gêne
  - conformité à des normes
- Pour mieux connaître
  - les sources vibratoires
    - naturelles (sismique, vent),
    - produites par humaines (transport, machines)
  - les milieux de propagation (sols)
  - les structures (constructions)
- Pour valider des modèles prédictifs
  - au stade de l'avant projet
  - pour dimensionner des modifications après projet

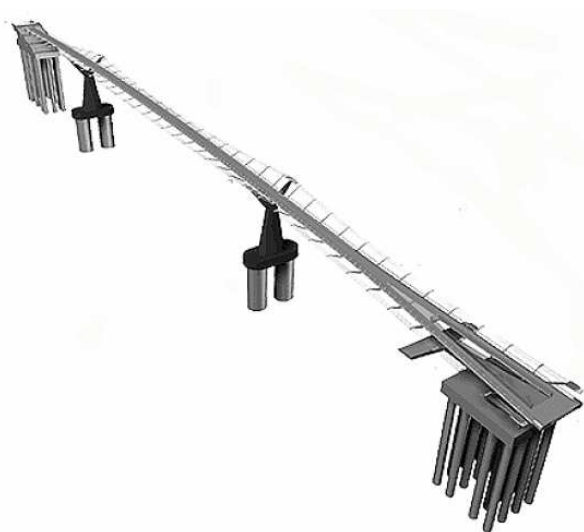
## Voir les vibrations

- Pont de Tacoma (état de Washington, USA),
  - Inauguré le 1er juillet 1940
  - Effondré le 7 novembre 1940.
- 
- L'un des plus célèbres accidents de génie civil !

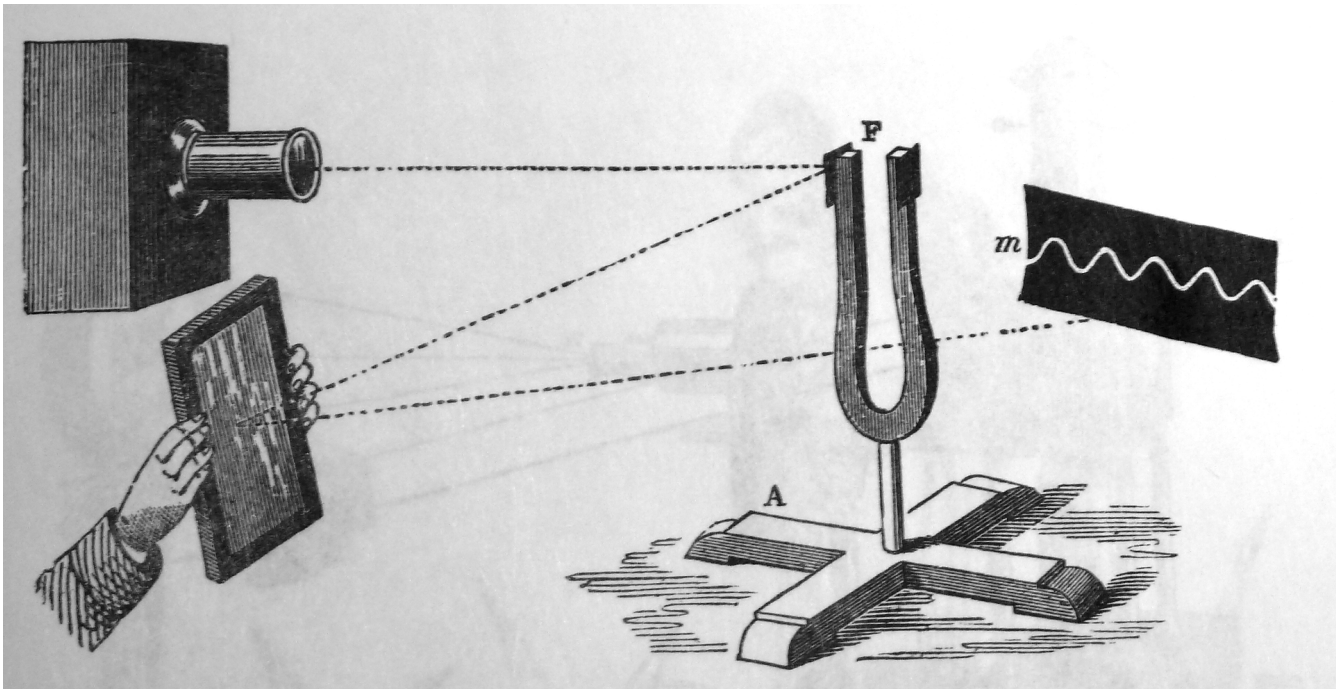


## Voir les vibrations

- Pont du millenium (Londres, RU)
- Inauguré le 10 juillet 2000
- 90000 visiteurs le jour de l'inauguration
- Les visiteurs accordent leur pas sur le balancement naturel du pont
- Pont nommé "Wobbly Bridge" (pont bancal)
- Installation d'amortisseurs pour contrôler les oscillations horizontales et latérales (2001-2002)



## Voir les vibrations : Tyndall (1820- 1893)

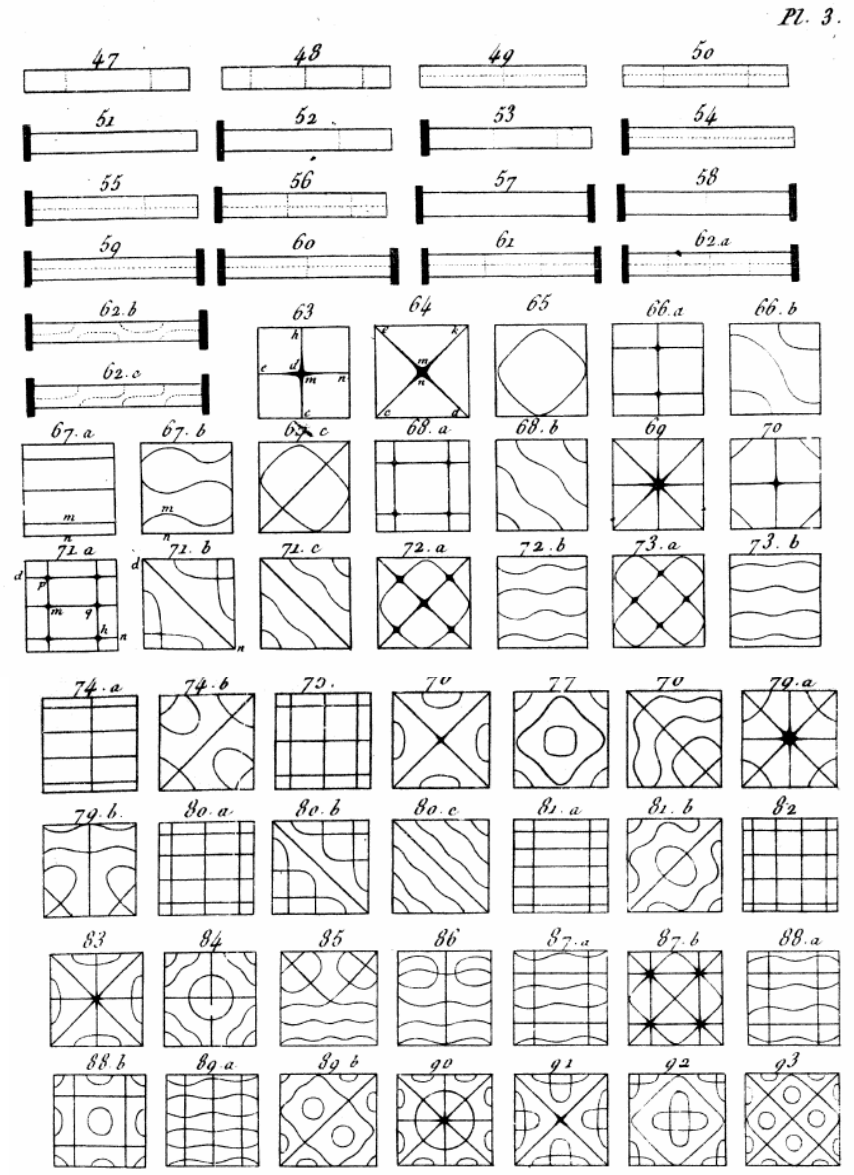


En général, les mouvements vibratoires sont trop faibles pour être visibles

# Voir les vibrations : l'expérience historique de Chladni

© 5190  
 TRAITÉ *ANNUALE*  
**D'ACOUSTIQUE,**  
 PAR E.-F.-F. CHLADNI,

NAPOLÉON-LE-GRAND  
 A DAIGNÉ AGRÉER  
 LA DÉDICACE DE CET OUVRAGE,  
 APRÈS EN AVOIR VU  
 LES EXPÉRIENCES FONDAMENTALES.



# Le capteur usuel : l'accéléromètre

- Principe

- masse sismique associée à un cristal piezoélectrique

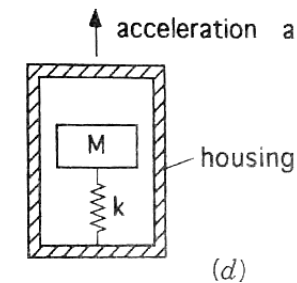
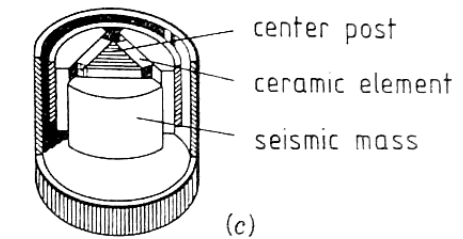
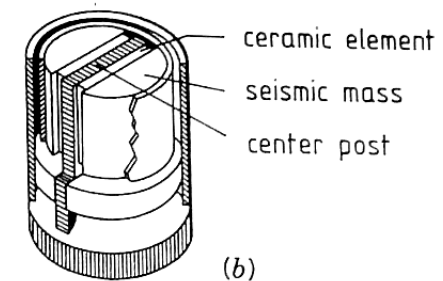
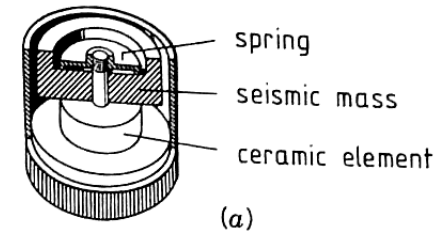
- Variété de montages

- compression ou cisaillement de l'élément sensible

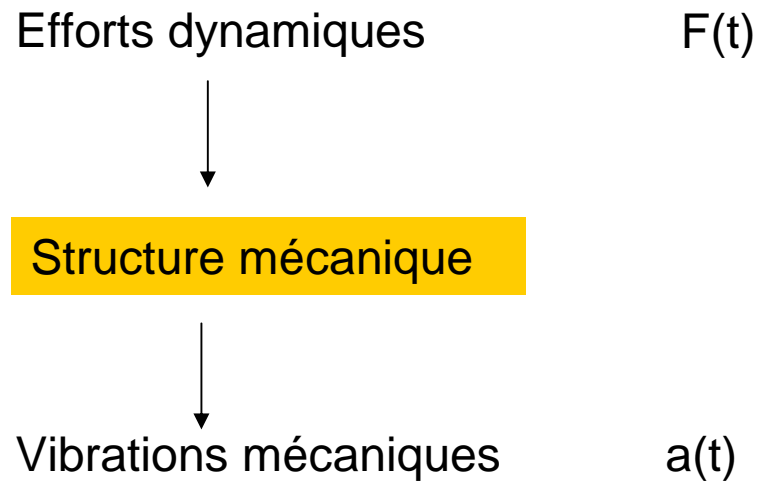
- Equivalent à un oscillateur à 1ddl

- Sur un principe similaire :

- le capteur d'effort (pas de masse sismique)
- la tête d'impédance (association de 2 capteurs)



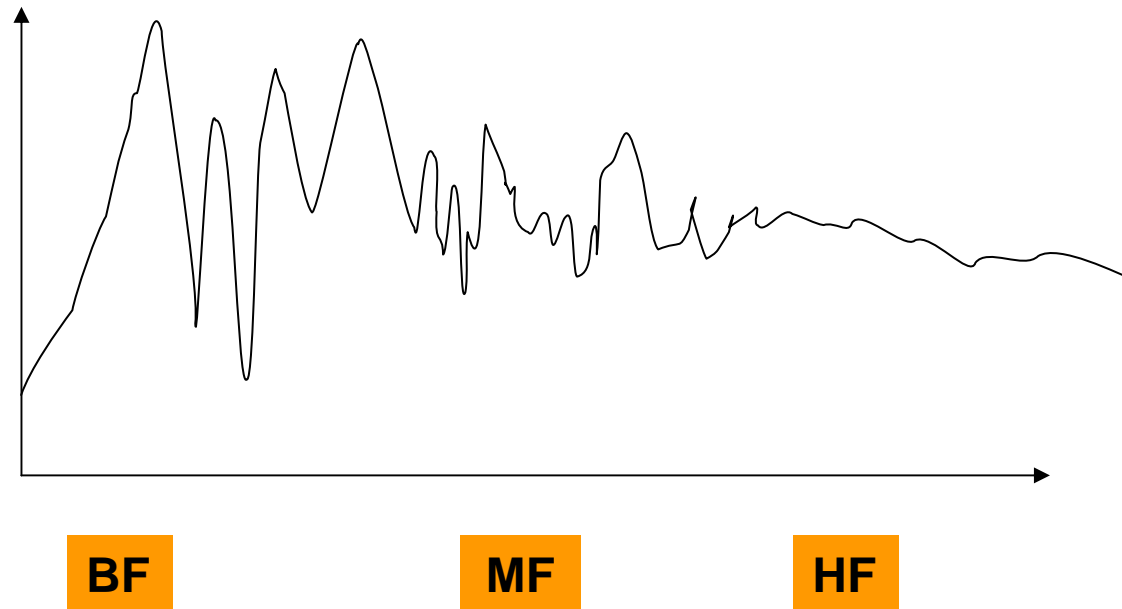
# Analyse opérationnelle et analyse modale



- 2 types d'analyse:
  - analyse en fonctionnement
    - Niveau trop élevé: génère un problème
    - Non conforme à une norme ou des spécifications
  - analyse modale



# Plages des basses, moyennes et hautes fréquences

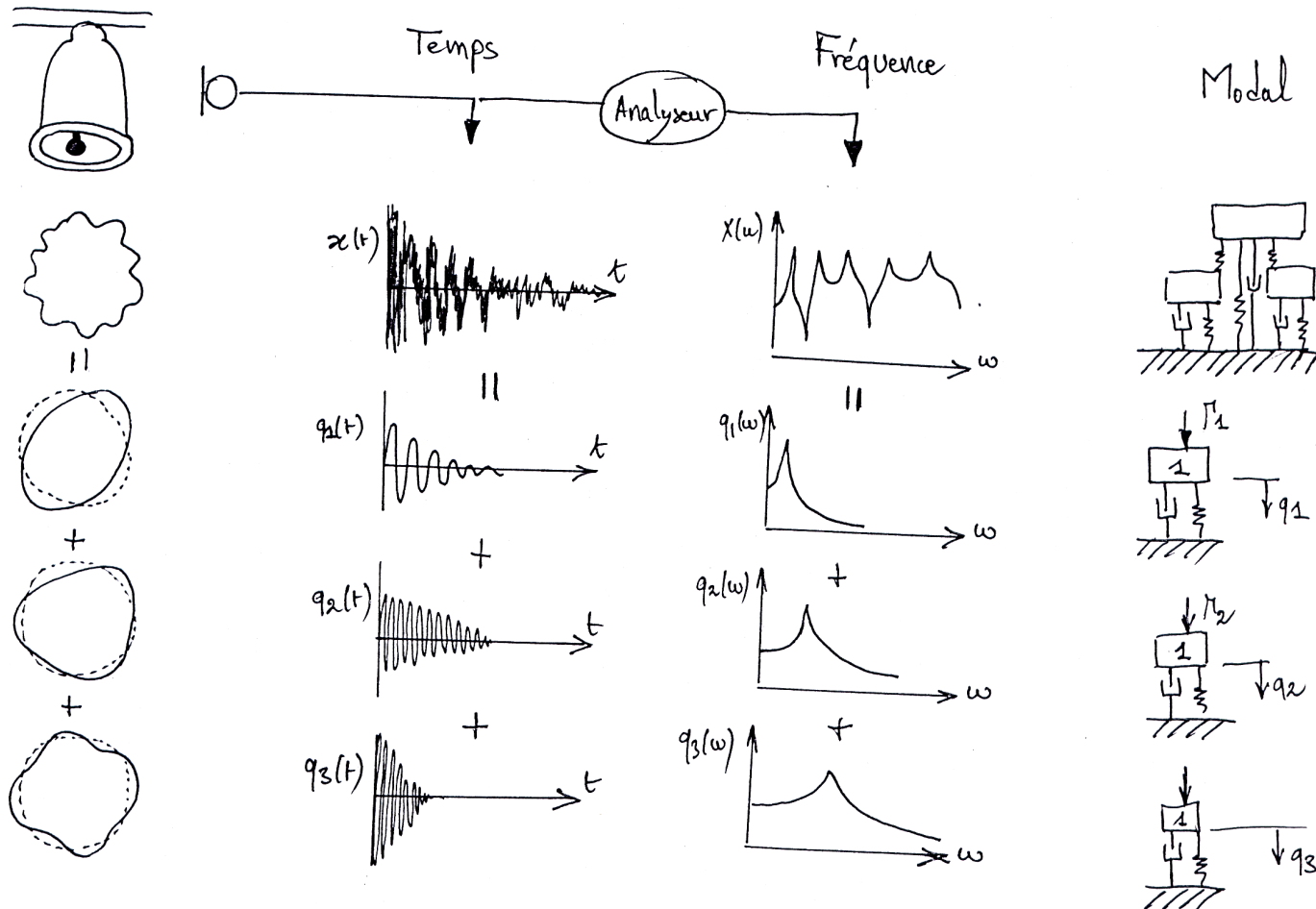


Recouvrement modal  
faible  
Méthodes modales

Recouvrement modal  
important  
Méthodes statistiques

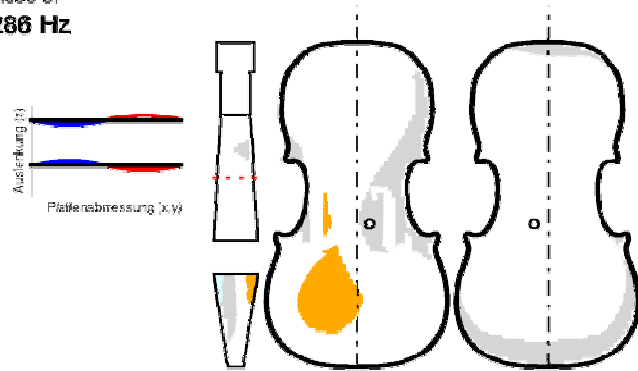
# Principe de superposition modale

Réponse d'une structure = somme de contributions modales



Analyse modale expérimentale: identification des paramètres d'un modèle modal

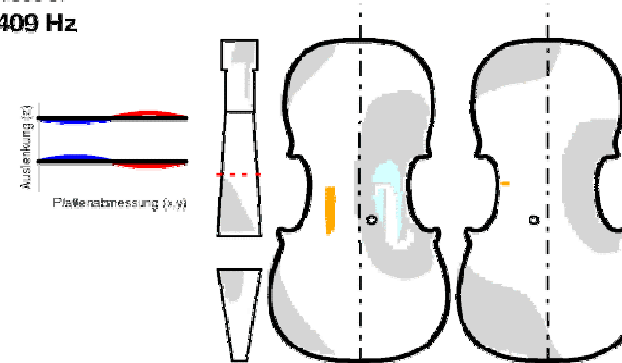
Mode 6:  
286 Hz



**Helmholtzresonanz (A0)**

*Stradivari 1712 "Schreiber"*

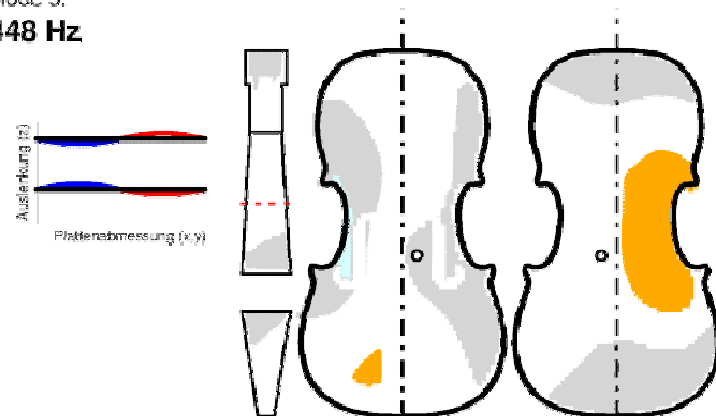
Mode 8:  
409 Hz



**Torsionsmode (C2)**

*Stradivari 1712 "Schreiber"*

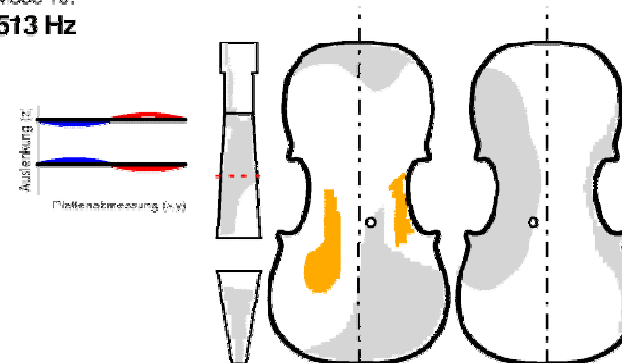
Mode 9:  
448 Hz



**Corpusmode (T1)**

*Stradivari 1712 "Schreiber"*

Mode 10:  
513 Hz



**Corpusmode (B1)**

*Stradivari 1712 "Schreiber"*

# Exemple d'identification modale sur un batiment

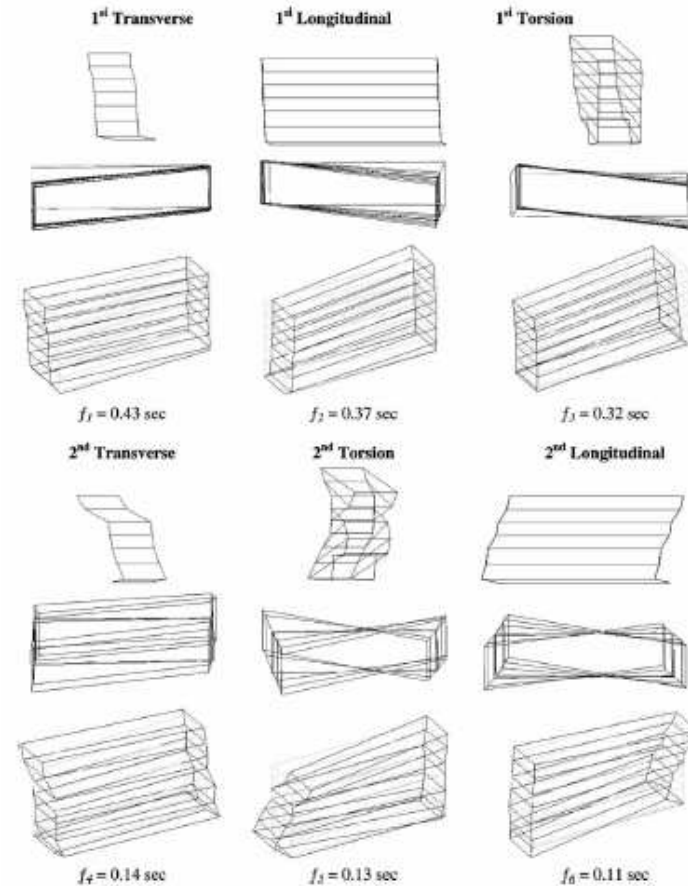


Fig. 6. Elevations, plans, and oblique views of the first six mode shapes of the building obtained experimentally.

C.E. Ventura<sup>a,\*</sup>, W.D. Liam Finn<sup>b</sup>, J.-F. Lord<sup>c</sup>, N. Fujita, Dynamic characteristics of a base isolated building from ambient vibration measurements and low level earthquake shaking, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23 (2003) 313–322,

# Les méthodes optiques

- Peu utilisées actuellement dans le contexte bâtiment
  - Méthode couteuse (cout en baisse)
  - Difficultés de mise en œuvre in situ (portabilité croissante)
  - Potentialités considérables.
- 
- Deux classes de méthodes
    - Les mesures ponctuelles (vibrométrie)
    - Les méthodes plein champ
      - Holographie numérique
      - Projection de franges

# Vibrométrie

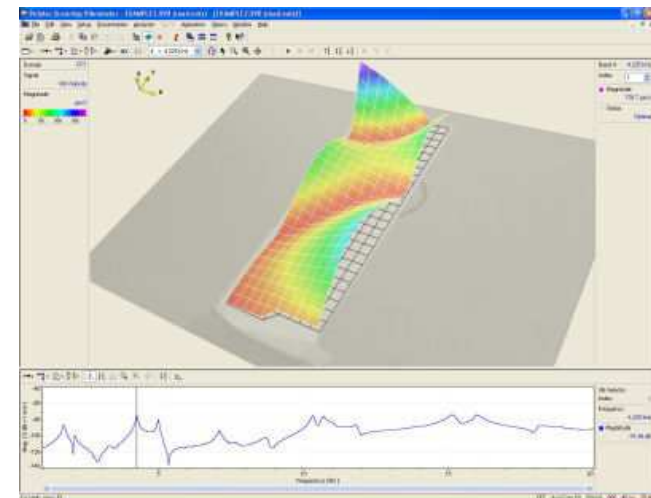
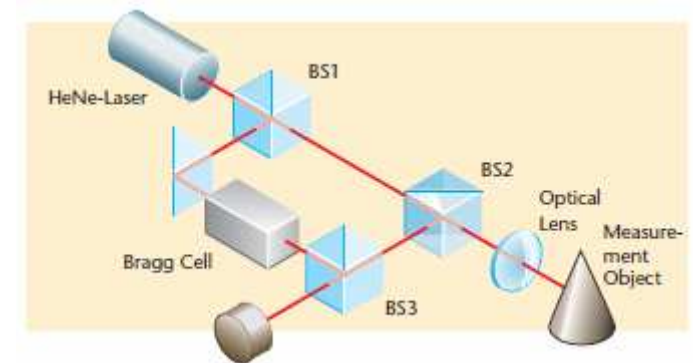
## Principe

- Utilisation de l'effet Doppler induit par la réflexion sur le point cible mobile
- Basé sur l'interférence entre le signal incident (référence) et le signal réfléchi (Doppler)

## Systèmes commerciaux portatifs

- Mesures hors plan
- Mesures dans le plan
- Mesures différentielles
- Mesures à balayage
- vMesure 3D

## Utilisation fréquente en dynamique des structures



# Holographie numérique

## Historique

- 1947 : inventée par Dennis Gabor 1947 (prix Nobel 1971)
- 1962 : utilisation du laser
- 1965 : interférométrie holographique
- 1993 : « début » de l'holographie numérique
- 1997 : holographie couleur tri-chromatique
- 20... : holographie numérique comme moyen de CND/mesures sans contact courant dans l'industrie

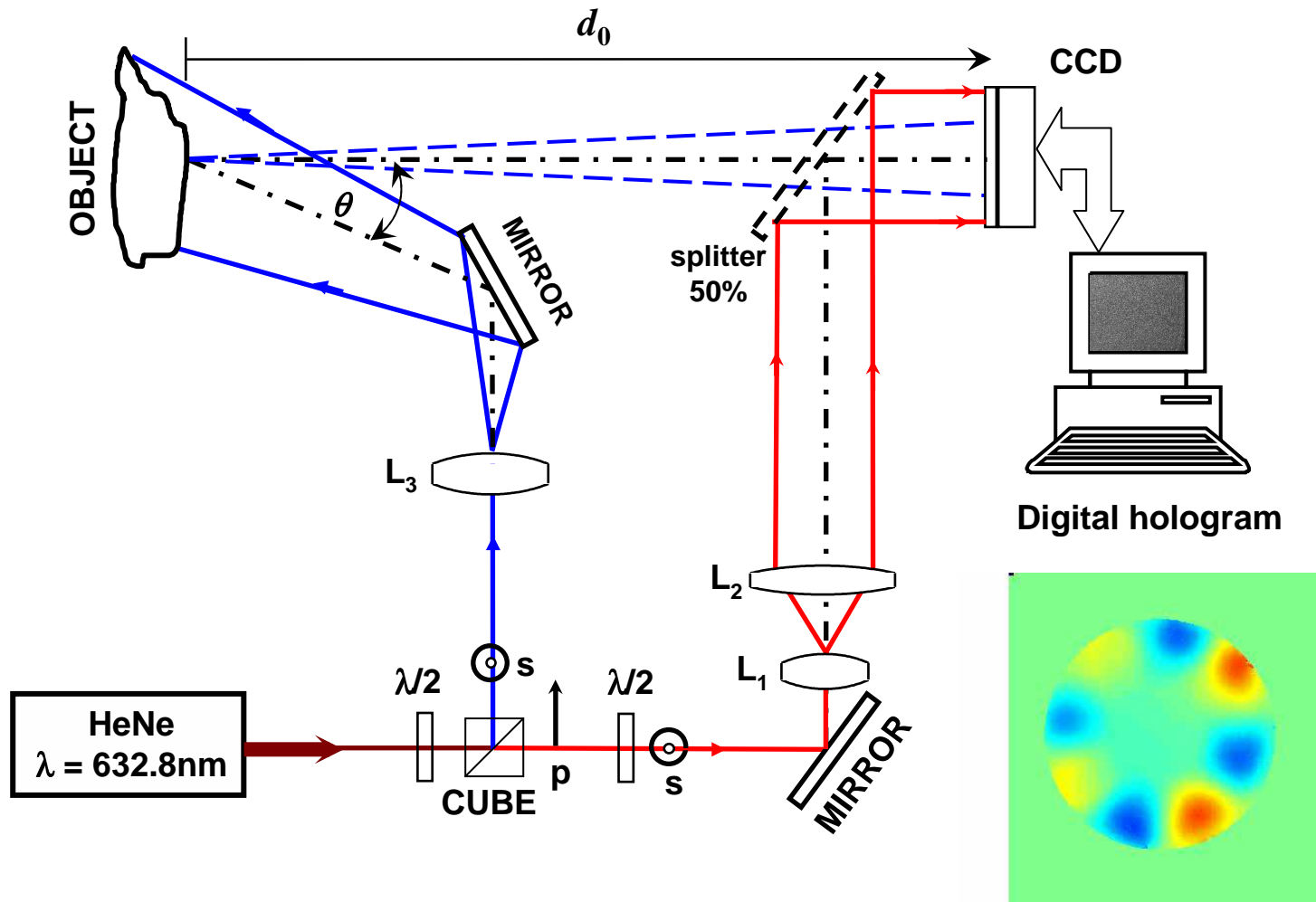
## Avantages

- mesures sans contact
- grande résolution spatiale (> 200000 points de mesure)
- inspection de formes complexes possible
- application à la plupart des matériaux
- en cours de normalisation en Europe / USA
- couplage avec une caméra rapide

## Inconvénients

- coût encore élevé pour les équipements (laser + capteur CCD)
- nécessite une bonne formation des opérateurs
- exigences de sécurité laser en usage courant

# Holographie numérique : exemple de montage expérimental





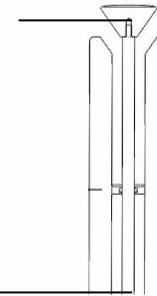
# Caractérisation de la transmission d'un bruit solidien

Utilisation d'une station d'écoute solidienne

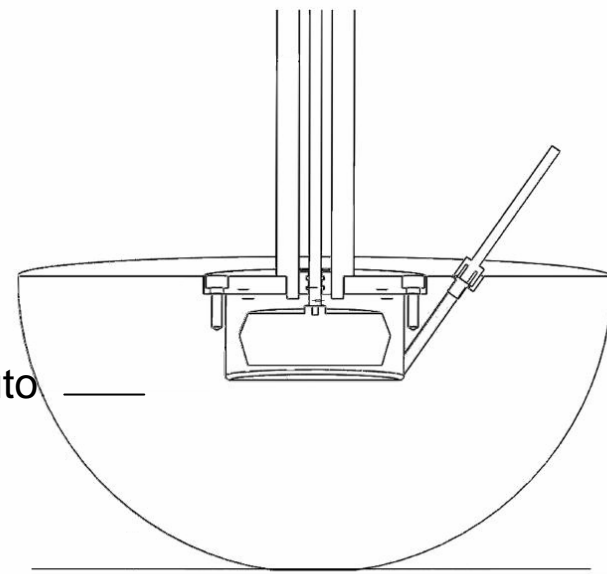
Transmission Vibreur - Tige – cône de contact- peau

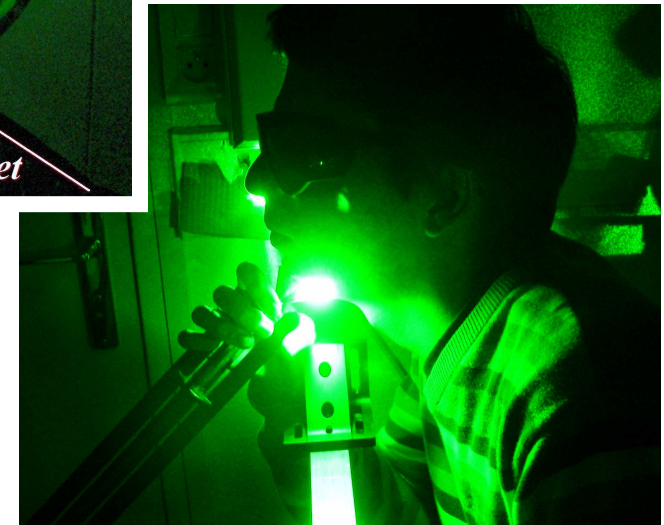
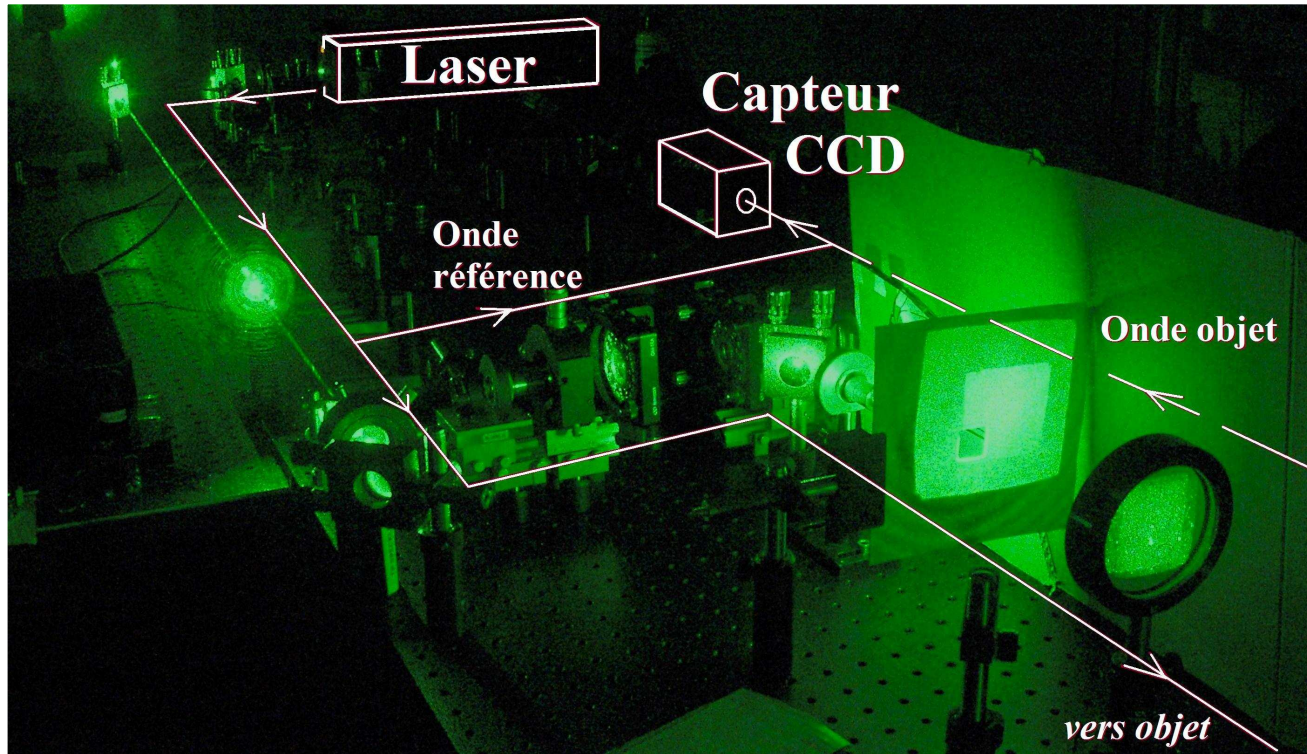


Cône de contact

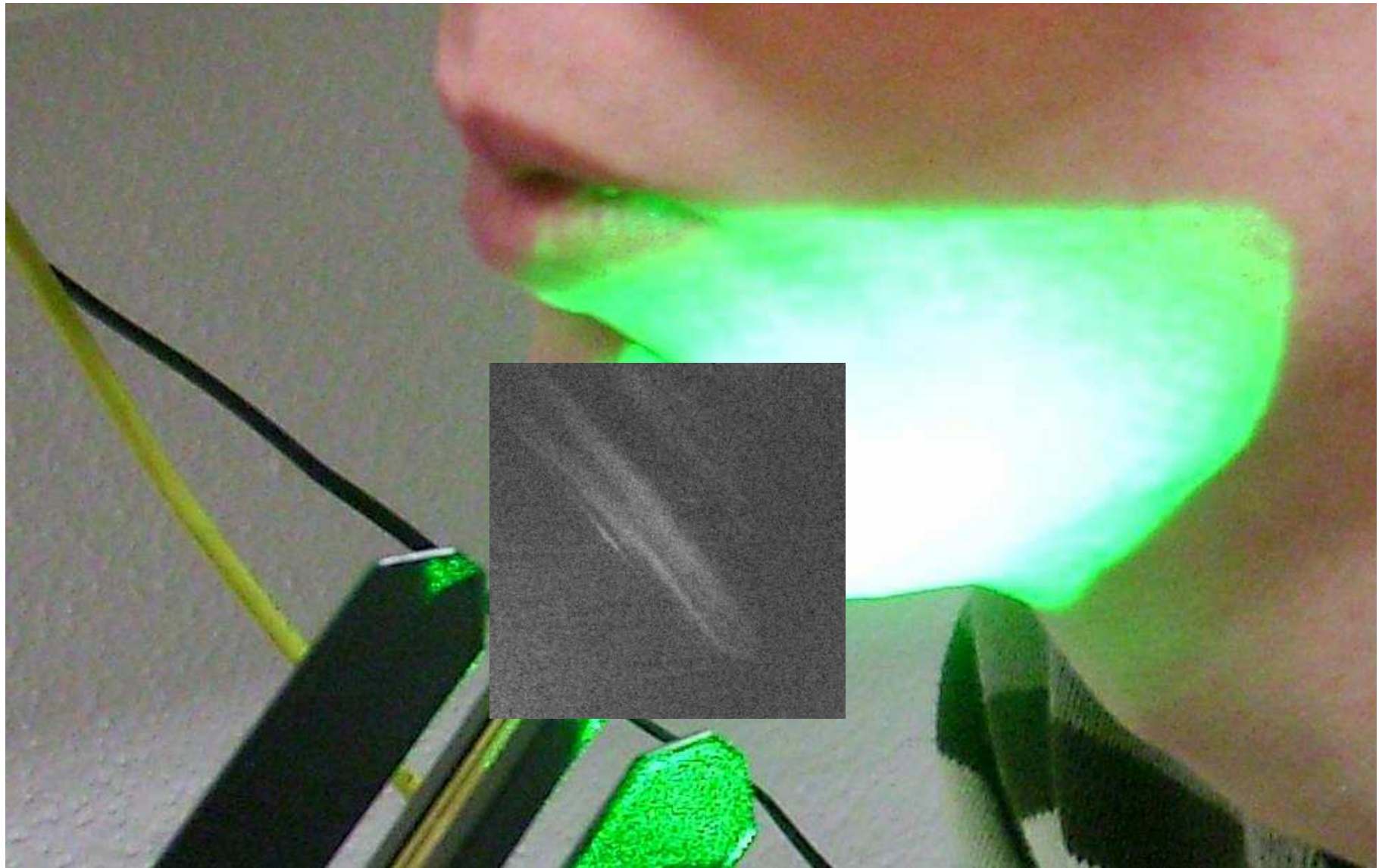


Tige



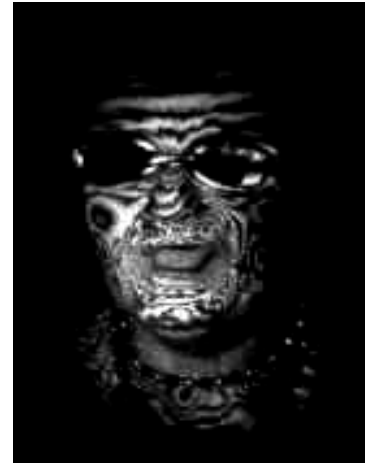


P. Picart et coll.

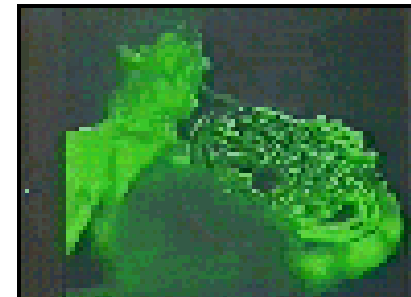
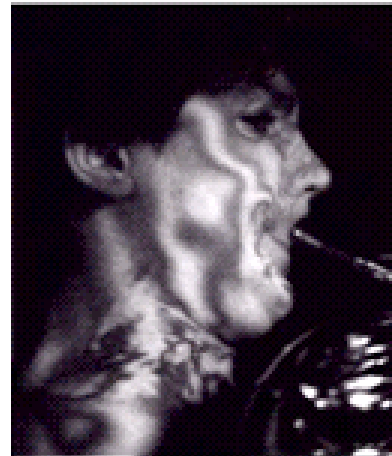


# Vibrations du corps humain

- Vibration du visage d'un chanteur d'opéra



- Vibrations d'un corniste



## Exemple d'utilisation sur une surface $>m^2$

- Protection et restauration de fresques murales

- Identification de décollement sous un enduit

- Excitation acoustique

- Mesure optique par holographie numérique

- T. Fricke-Begemann et coll. , Université de Oldenburg  
Optics and Lasers in Engineering 32 (2000) 537-548.

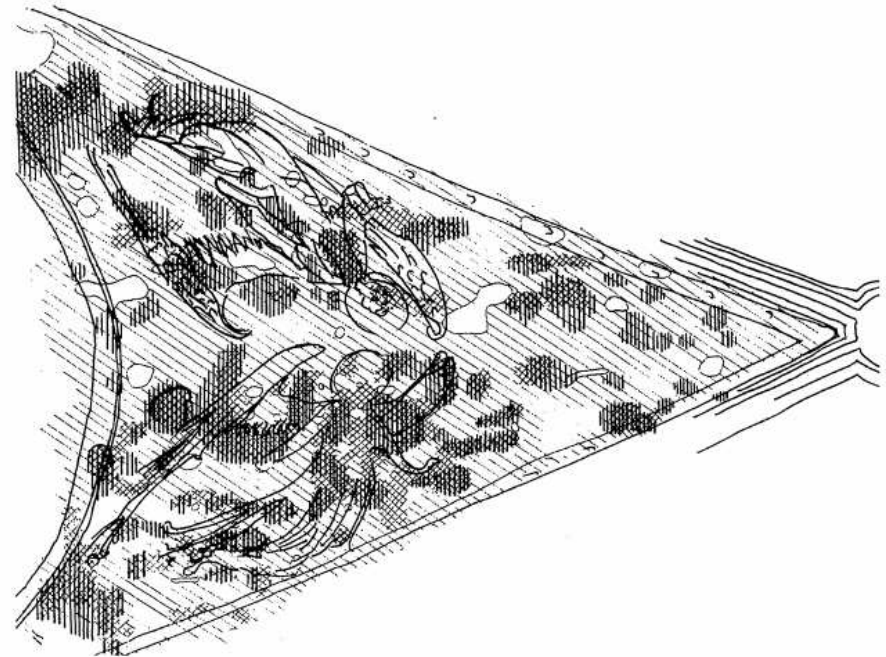


Fig. 8. Exploration map of loose plaster regions in first test section. Wide-spaced hatching from upper left to lower right: bond potentially weakened according to percussion method; narrow hatching from lower left to upper right: definitely loose according to percussion method; vertical hatching: definitely loose according to ESPI investigation.

# Holographie à « temps moyenné » : base modale d'une guitare

B. Richardon, Université de Cardiff, RU



Air 103 Hz



215 Hz



268 Hz



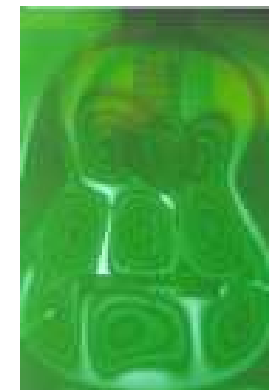
436 Hz



553 Hz



731 Hz



873 Hz

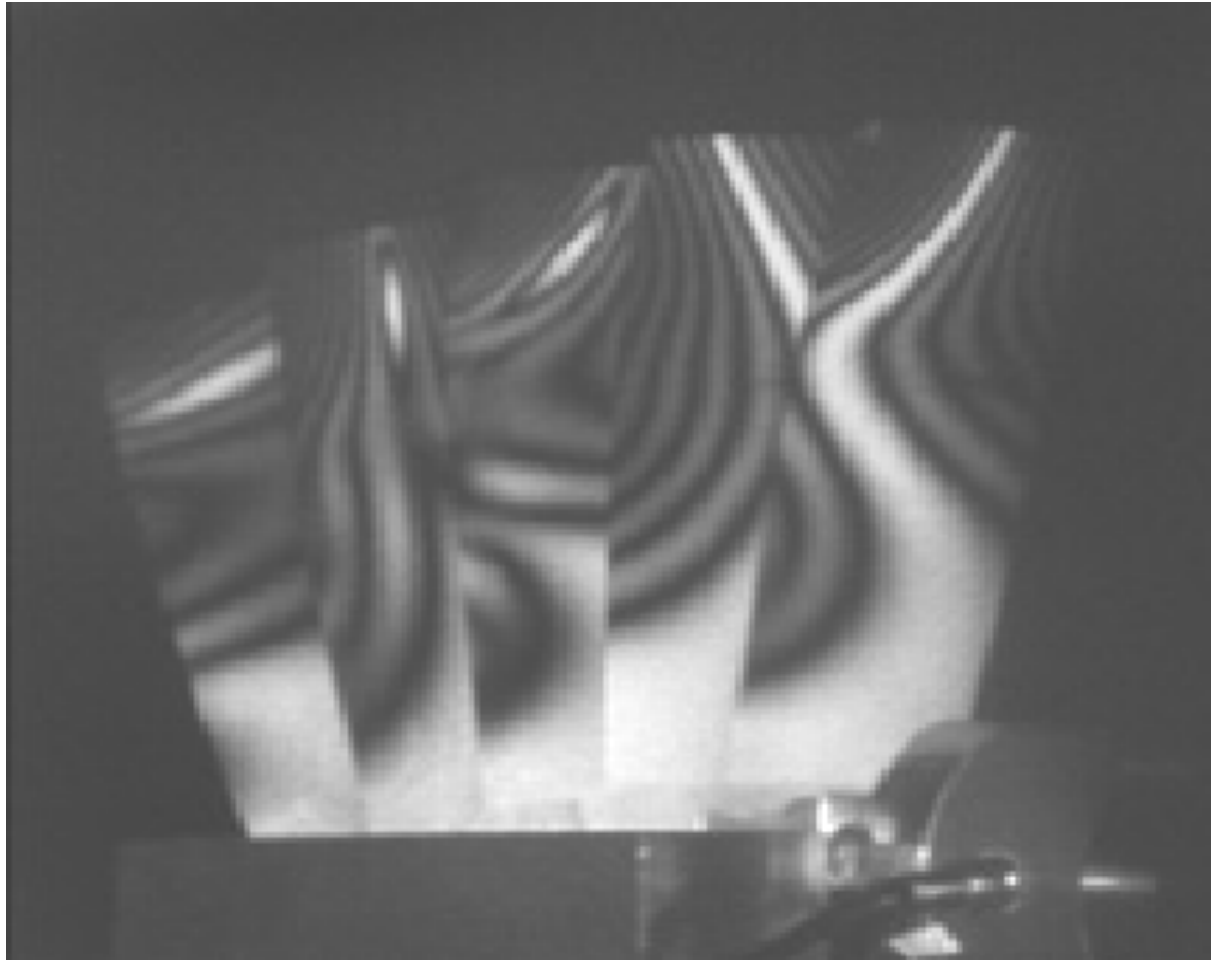


1010 Hz



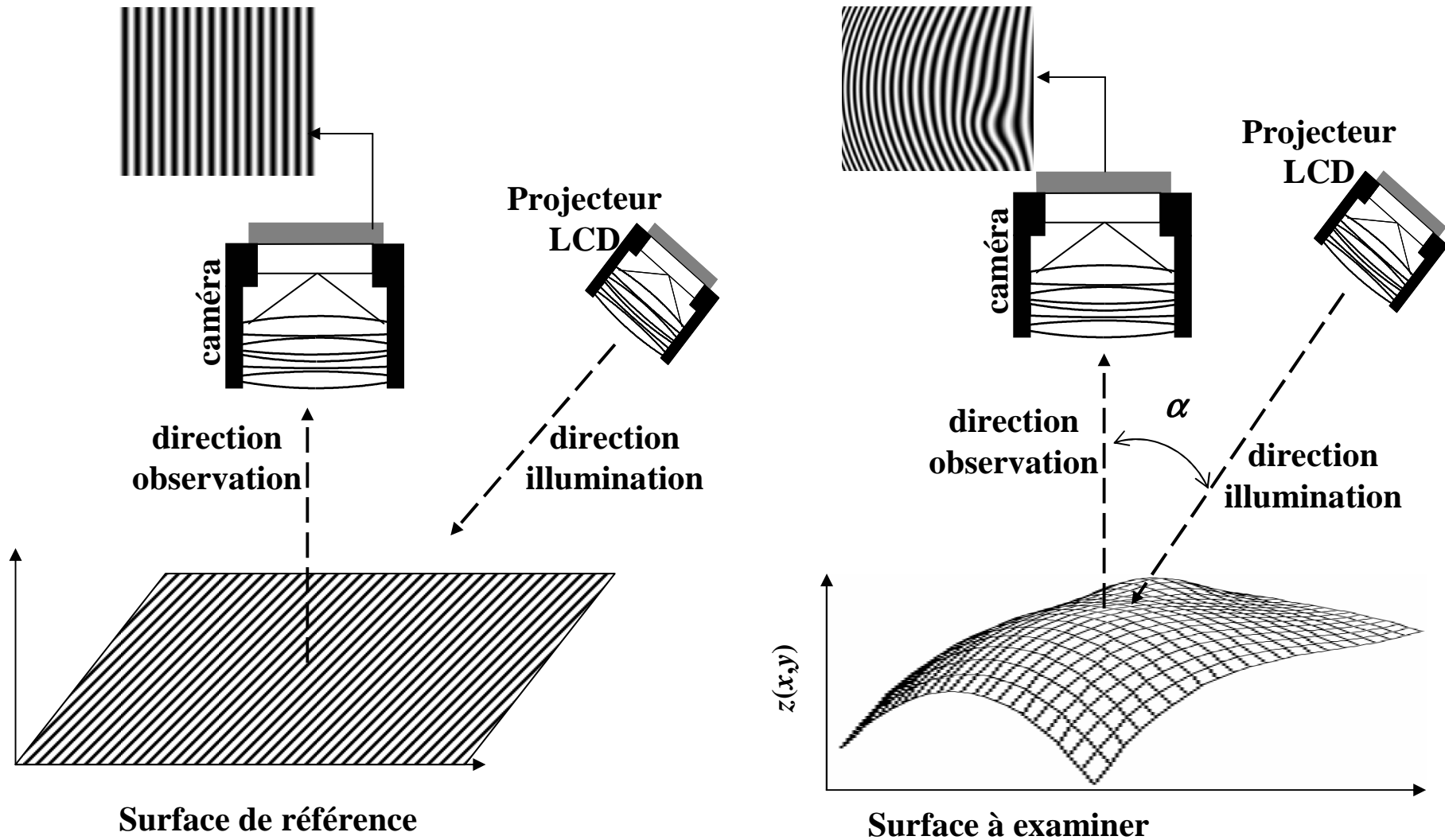
1174 Hz

## Holographie à « temps moyenné »



**Mode d'une pale de turbine**

# Projection de lumière structurée : principe





# Projection de lumière structurée : application sur un objet pyramidal

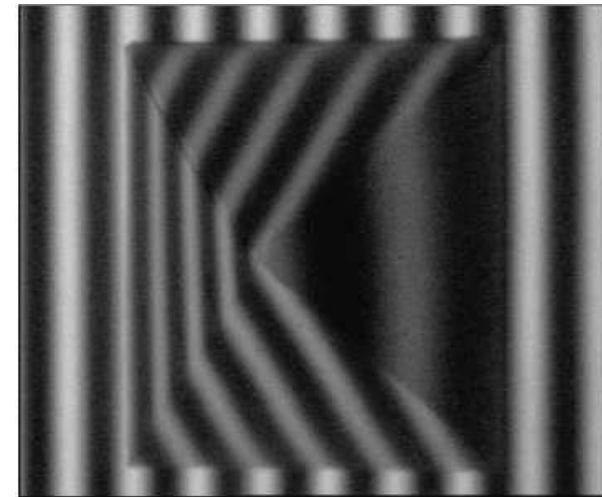
## Système de projection de franges

Source : <http://www.gom-france.com/>

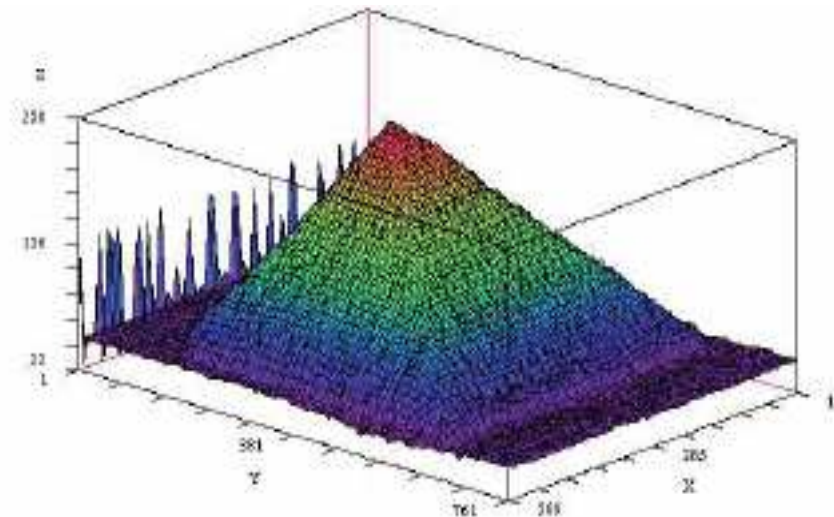


- Résolution : fraction du pas des franges
- Couplage possible avec une caméra rapide
- Contraintes en matière de sécurité moins sèves qu'avec un laser de forte puissance

## Observation des franges



## Profil de la pièce



# Les techniques d'antennerie

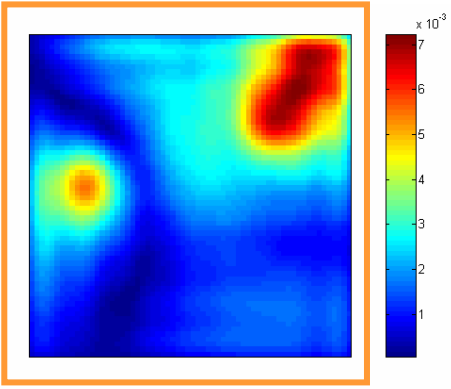
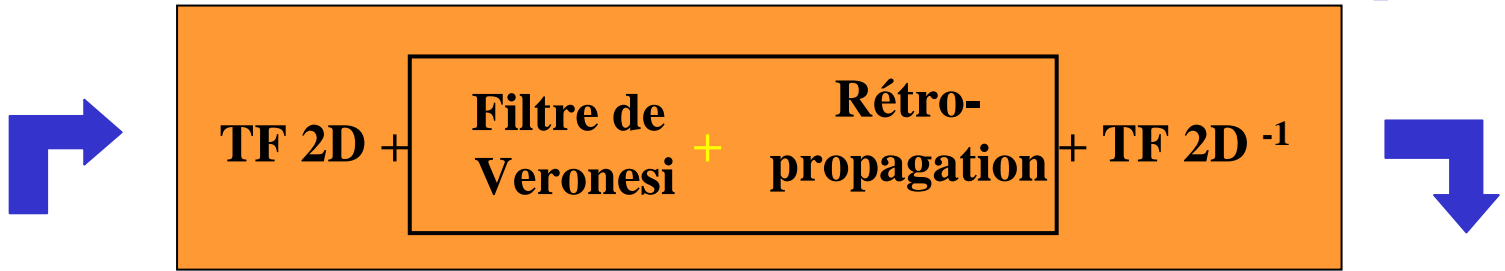
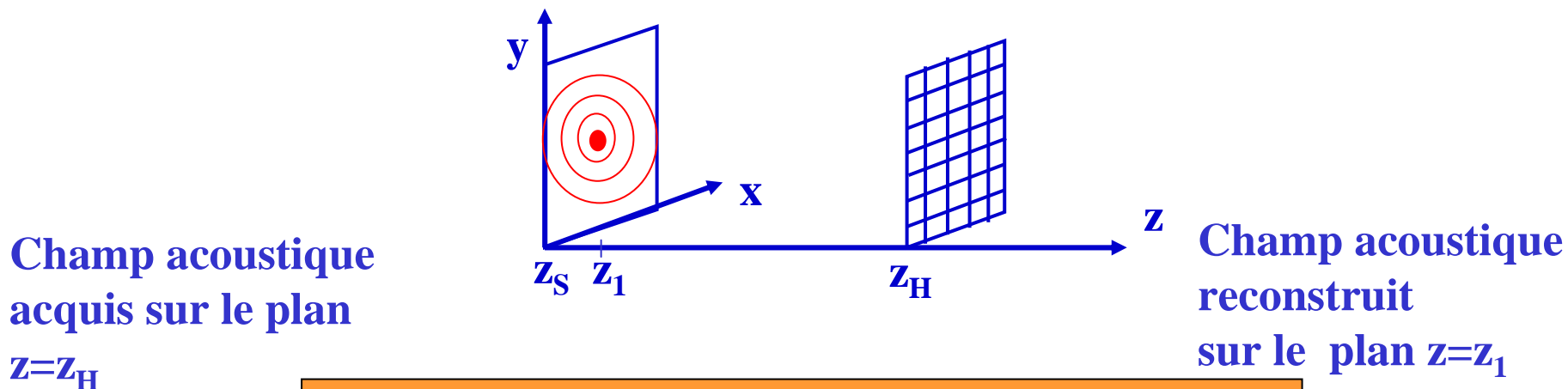
Antennerie acoustique :

- En champ proche : holographie acoustique
- En champ lointain : formation de voies

Antennerie vibratoire

- Reconstruction d'efforts par méthode RIFF

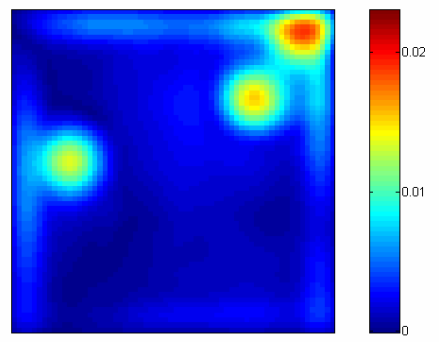
# Holographie acoustique de champ proche pour les sources stationnaires



1 champ spatial pour 1 fréquence

Spectre de nombre d'onde

Domaine espace / fréquence



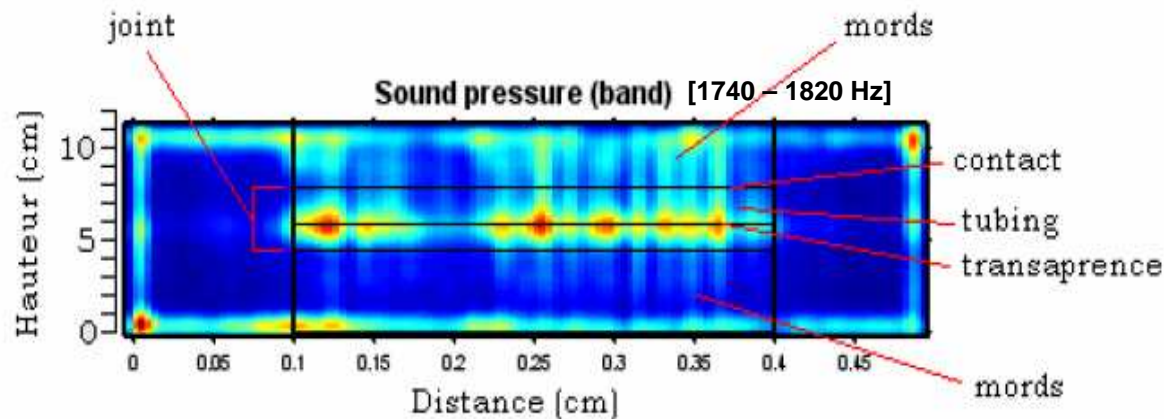
$k_c = 0.6 k_{max}$

## Exemple d'application : joints d'étanchéité de portière de voiture

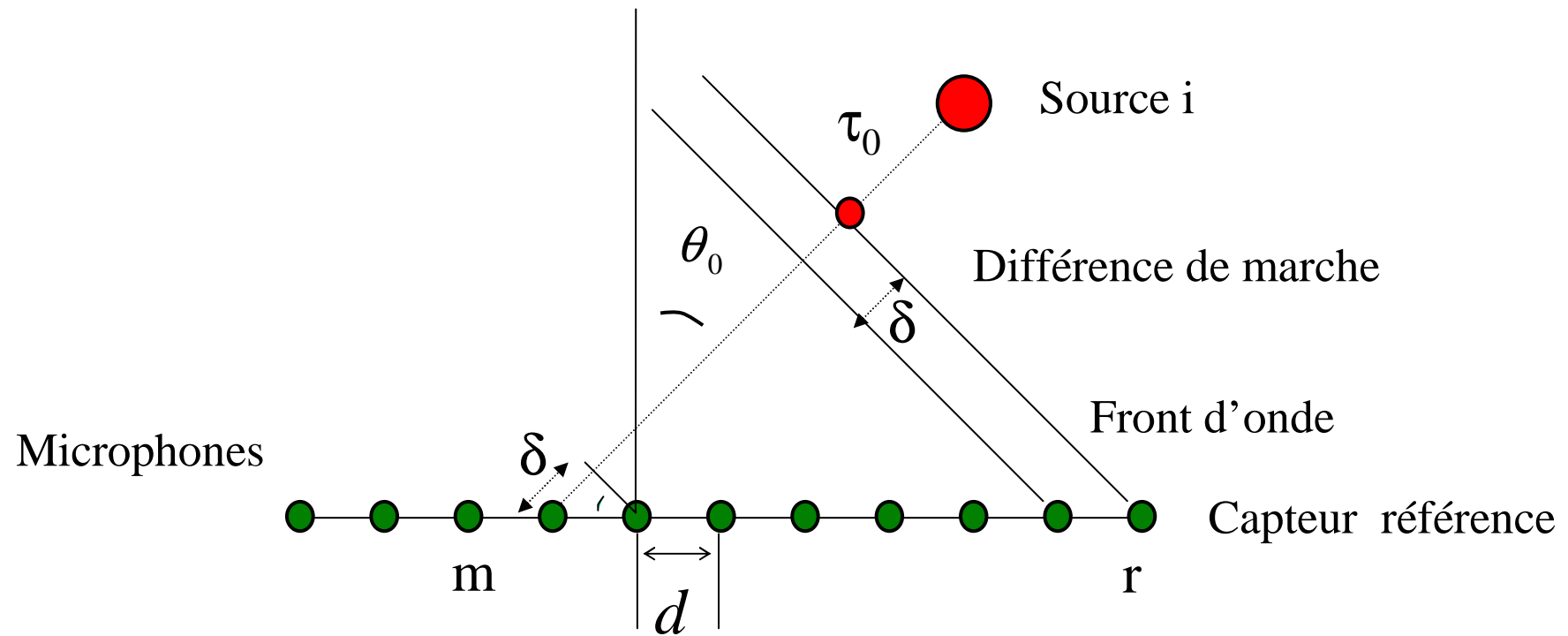
- Entreprise Cooper Standard Automotive
- Transparence acoustique de joints élastomère
- Contact joint –structure
- Tubing (résonance de la cavité du joint)



J.H. Thomas, J.C. Pascal

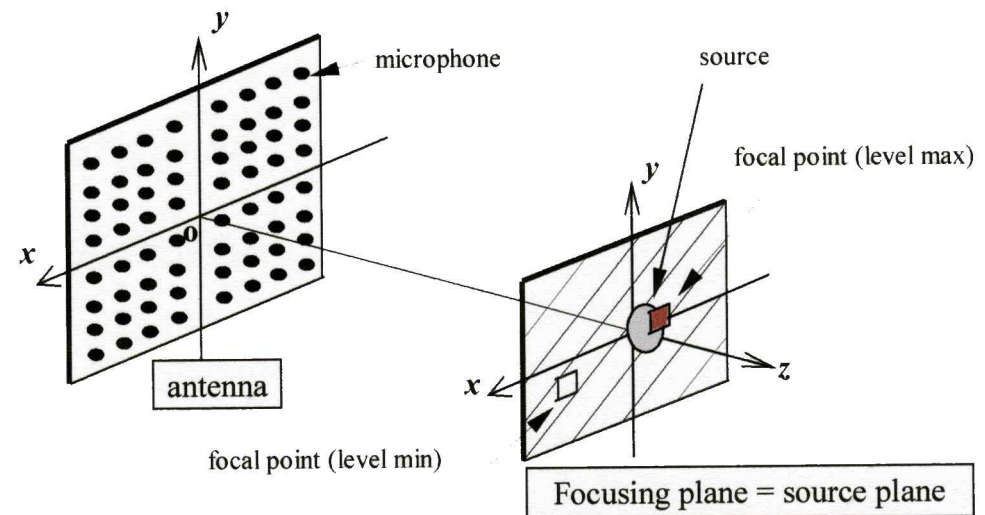
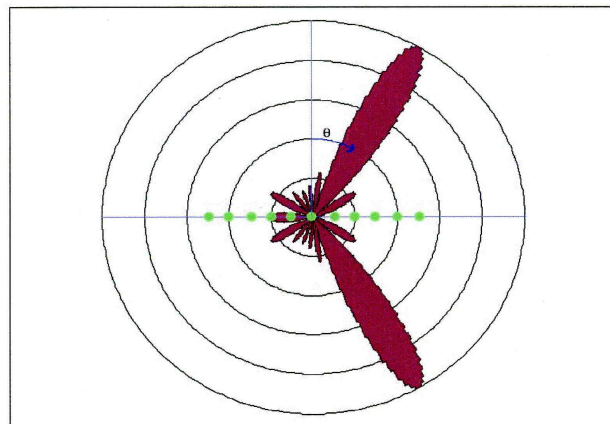
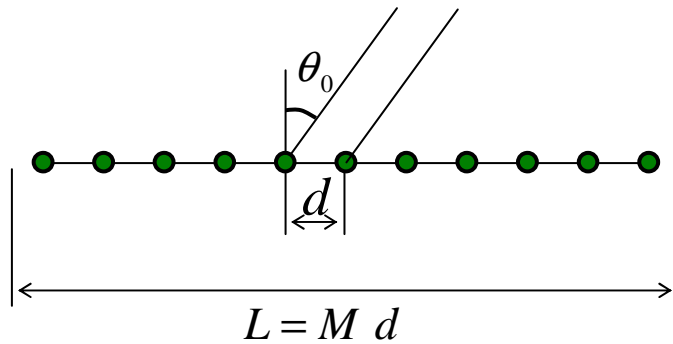


## Formation de voies : principe



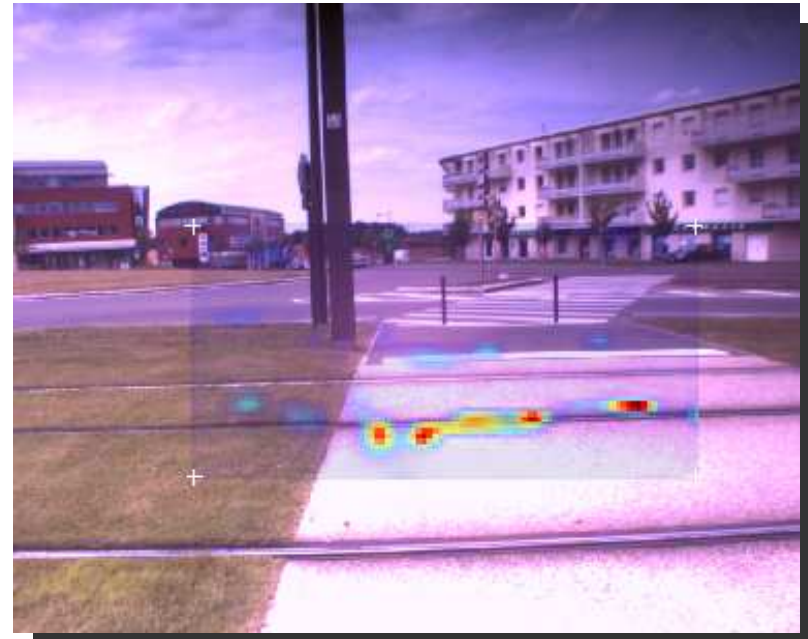
- Hypothèse d'une source monopolaire située en  $i$
- Calcul des signaux vus sur les microphones  $m$  compte tenu de leurs déphasages avec un microphone de référence  $r$  : les voies sont retardées en fonction de la position du point focal
- Calcul d'un indicateur (somme) en fonction de la direction (réponse angulaire)

# Formation de voies : principe



- Choix de l'agencement de l'antenne pour augmenter la résolution du lobe principal.
- Compromis avec lobes secondaires
- Existence de sources fantômes limitée par l'utilisation d'un agencement non régulier
- Champ lointain : technique plutôt adaptée aux problèmes extérieurs

## Localisation de sources de bruit induites sur un rail



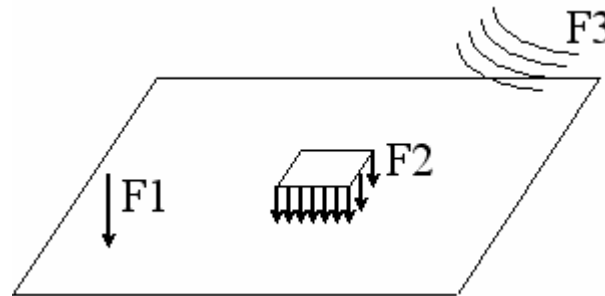
J.H. Thomas, J.C. Pascal, 2008

# Antennerie vibratoire : méthode RIFF (Résolution Inverse Fenêtrée Filtrée)

## Objectif

Identifier les efforts exercés sur un panneau (= efforts transmis)

Caractérisation de source

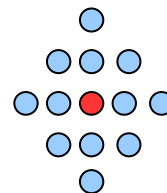


## Principe

- Calcul de la distribution de force excitatrice en utilisant l'équation du mouvement

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) - \rho h \omega^2 w = F(x, y, \omega)$$

- Différences finies (plaque): 13 points

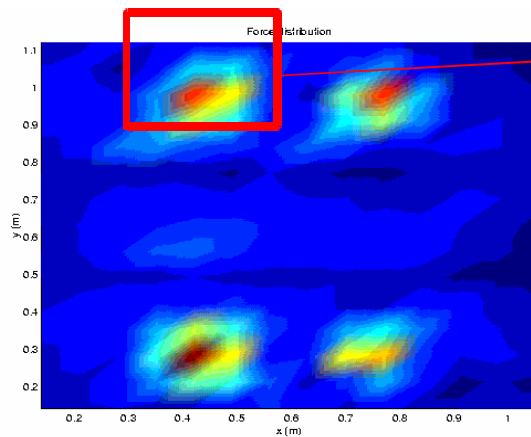
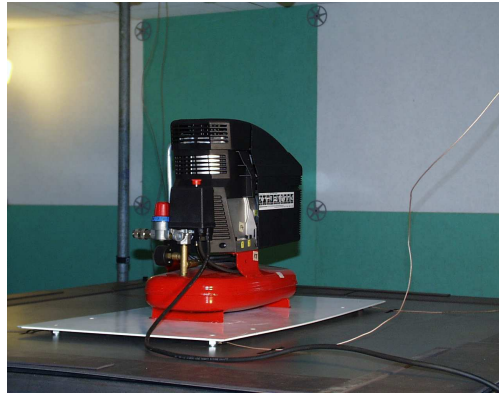


- Régularisation par fenêtrage et filtrage
- Travaux de C. Pezerat depuis plus de 10 ans (Insa de Lyon puis Laum(2009))



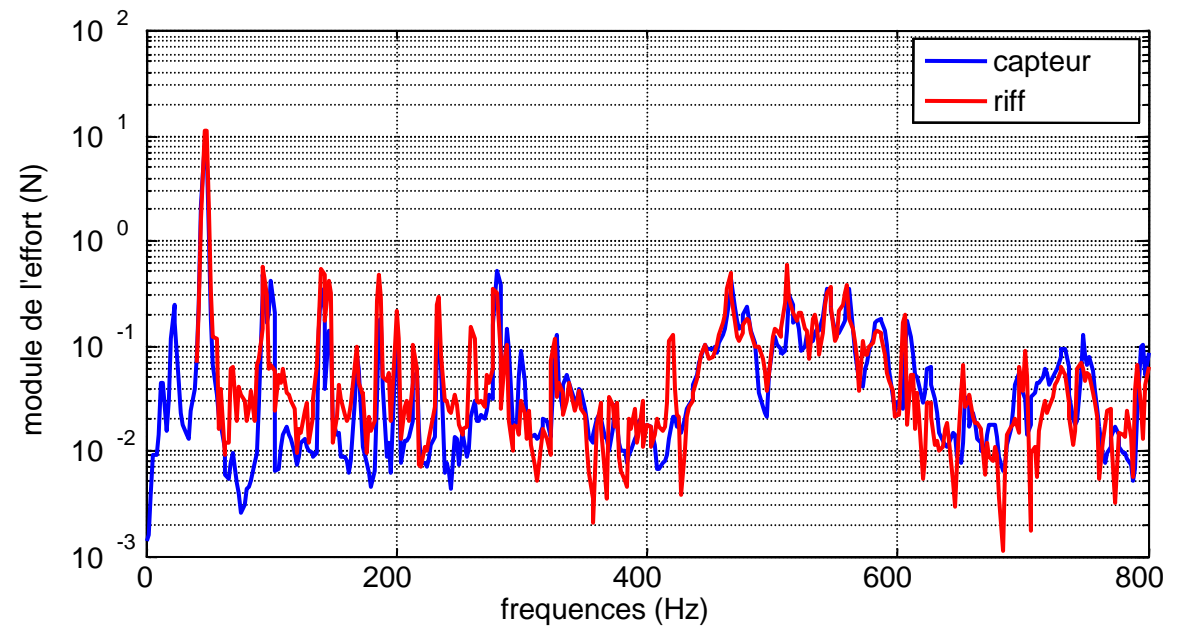
# Identification d'efforts transmis par méthode RIFF : exemple

## Compresseur (INRS)



C. Pezerat et coll., Lyon

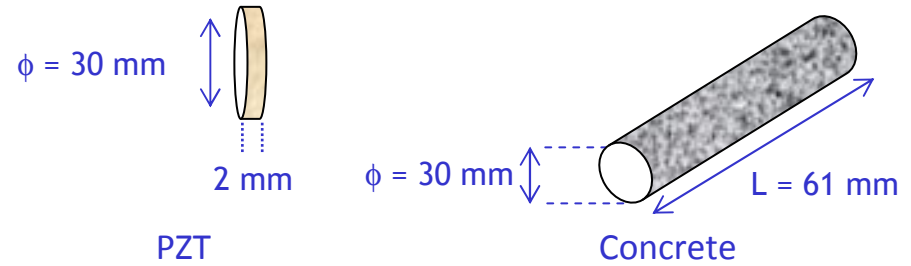
## Comparaison capteur - RIFF



# Vibrations et controle non destructif : exemple d'un béton

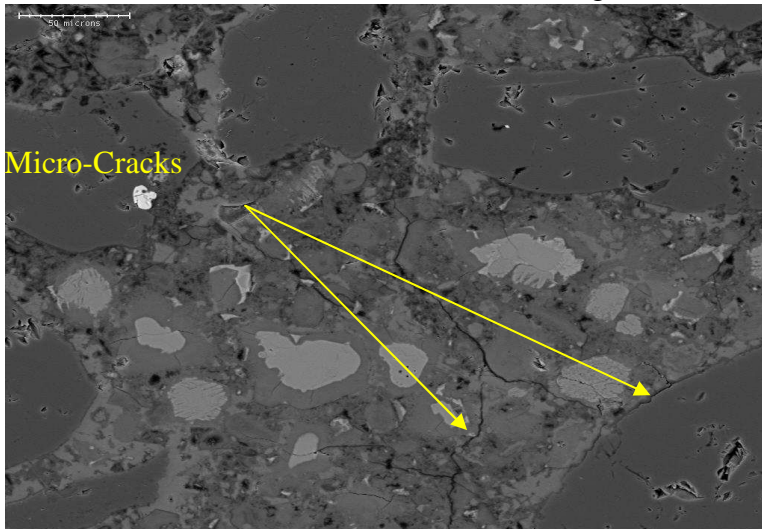
## Characteristics of a concrete

- Mixture of: rocks, sand, cement and water
- Porosity = 14 % ;  $0.5 \mu\text{m} \leq \phi \leq 315 \mu\text{m}$
- No preferential grain orientation (isotropic)
- Cracks:  $\leq 2 \text{ mm}$  long ;  $\leq 10 \text{ microns}$  opening



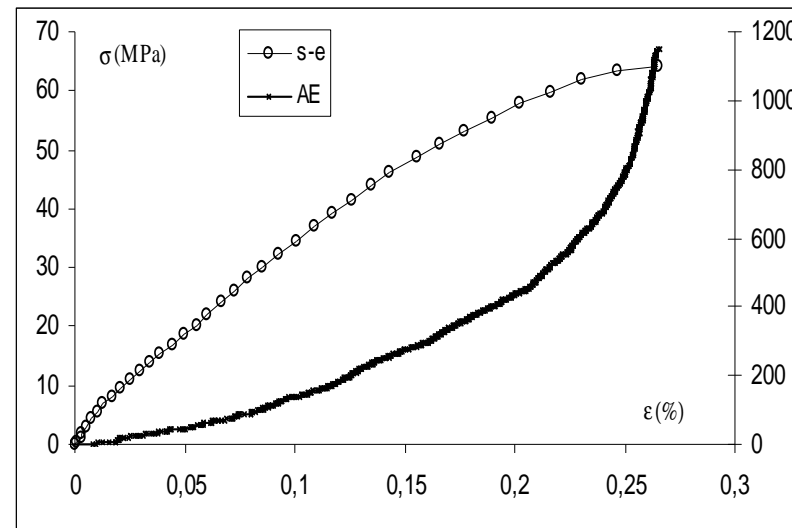
### 1- Undamaged sample

Existence of Micro-cracks before damage



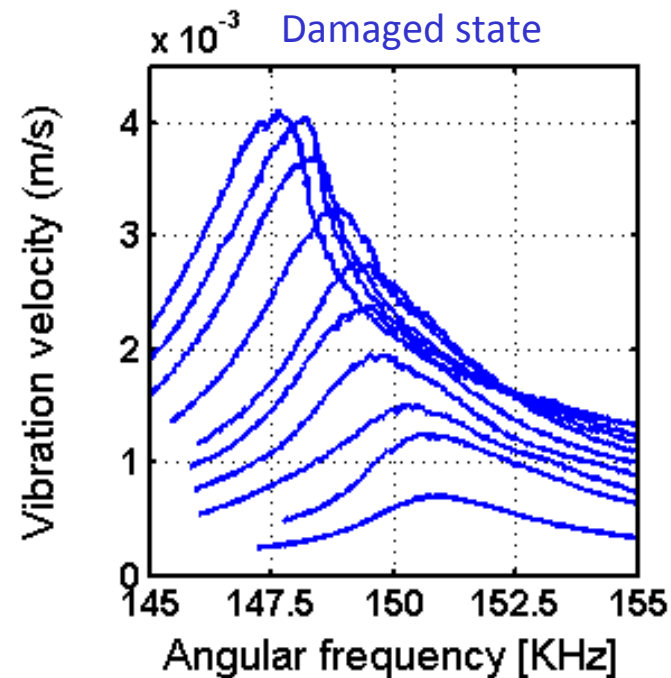
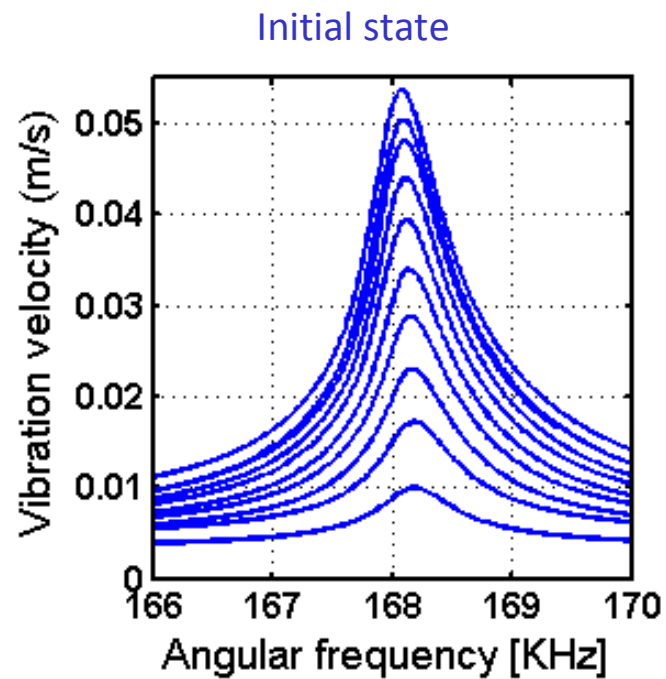
### 2- Damaged sample

Compression test used to damage concrete



# Characterisation of concrete

- Resonance curves are obtained for different driving amplitudes (10 to 100 mV)
- For initial and damaged states, successive resonance curves are measured without letting the system relax



- M. Bentahar et coll. 2004

## Comment mesurer les vibrations ?

- En pratique, l'accéléromètre reste le capteur le plus simple de mise en oeuvre
- Développement considérable de la métrologie optique depuis 15 ans.
  - Vibrométrie, holographie
  - Limitations pour une utilisation in situ.
- Identification de sources par techniques d'antennerie
  - sources acoustiques : holographie, formation de voies
  - sources vibratoire : identification d'efforts