



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

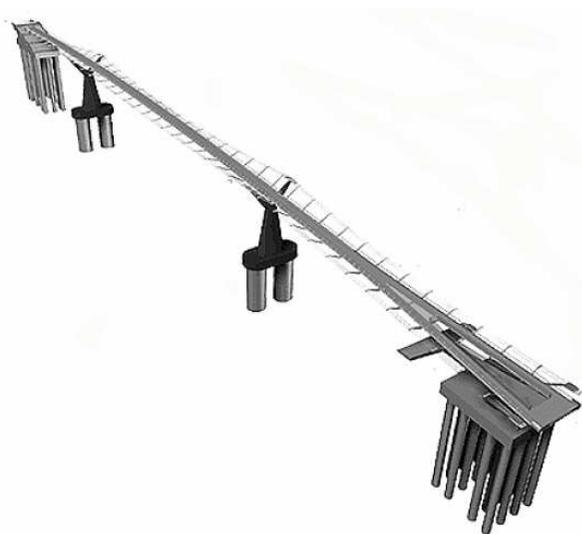
Voir les vibrations

- 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 !

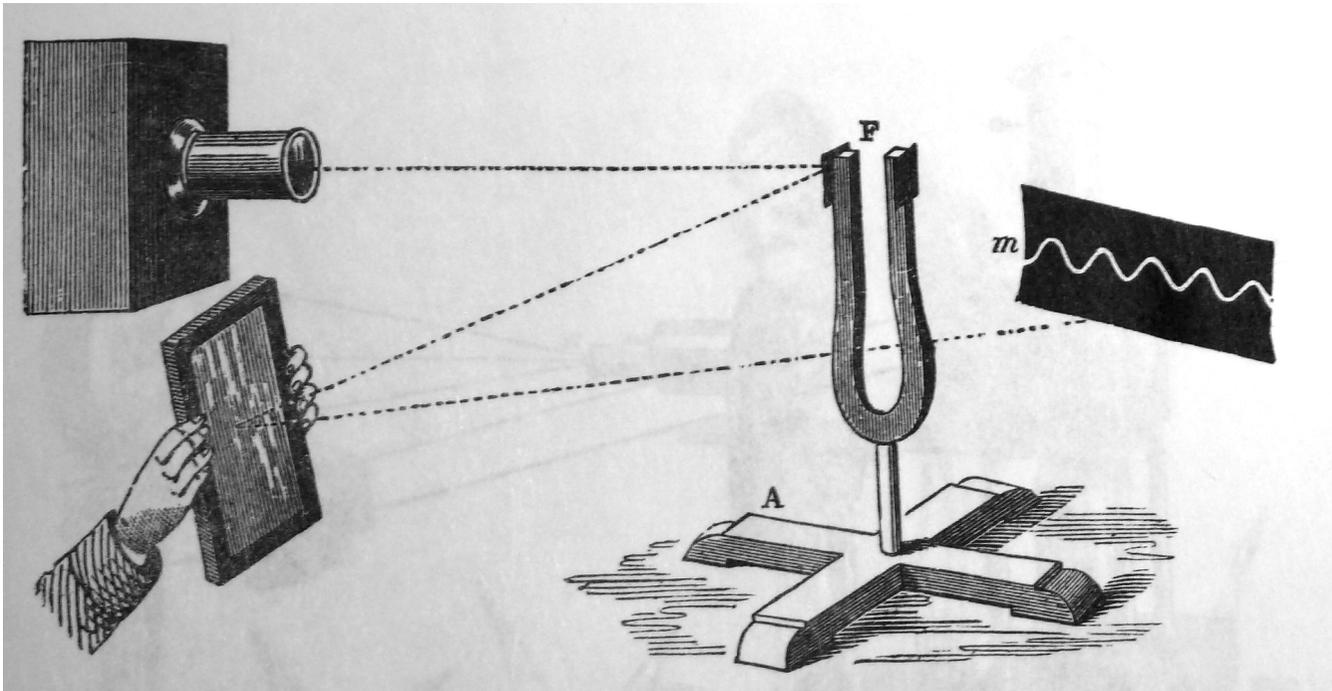


Voir les vibrations

- 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)

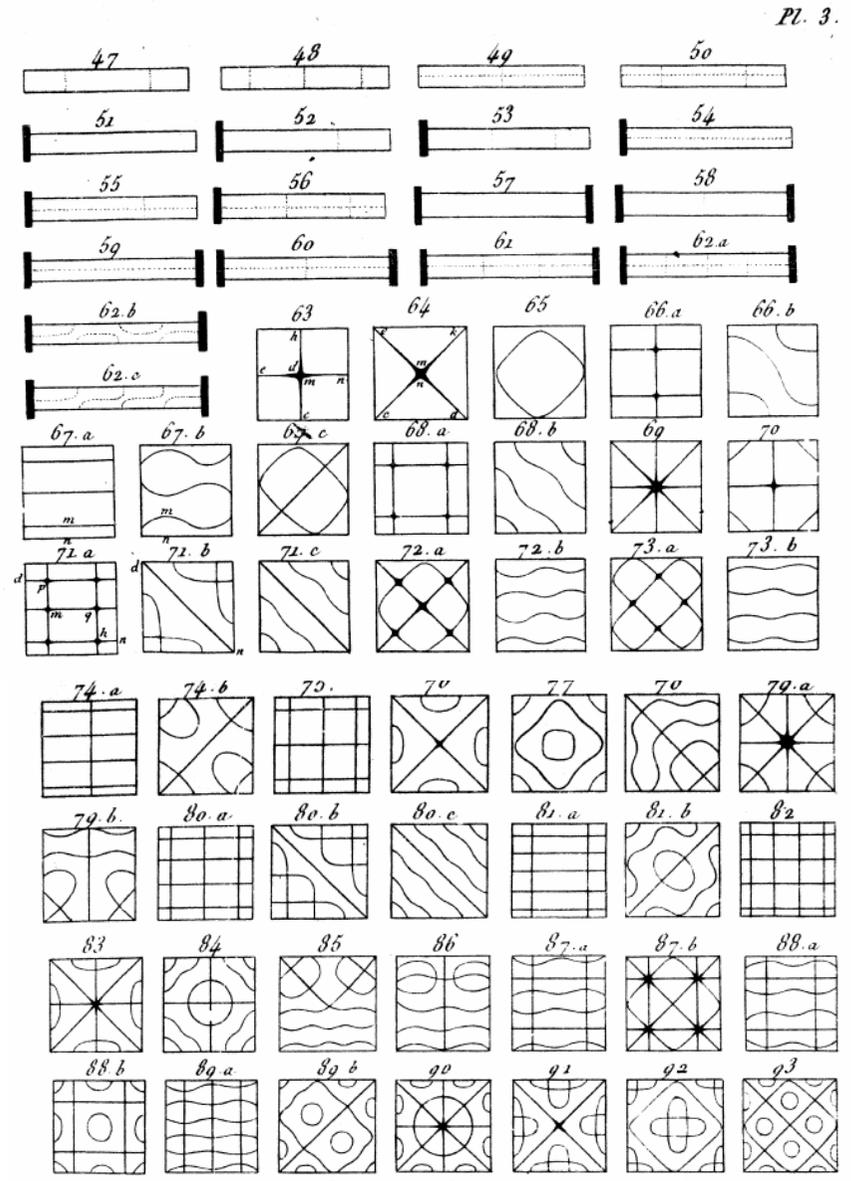


En général, les mouvements vibratoires sont trop faibles pour être visibles

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

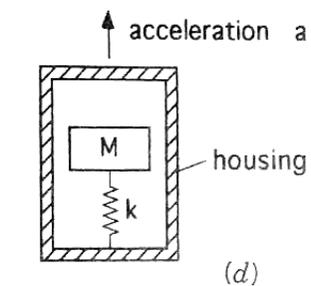
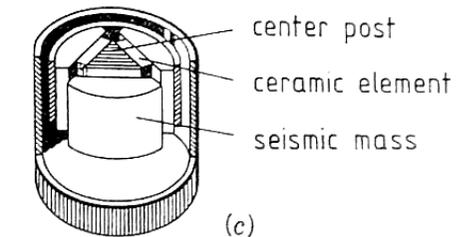
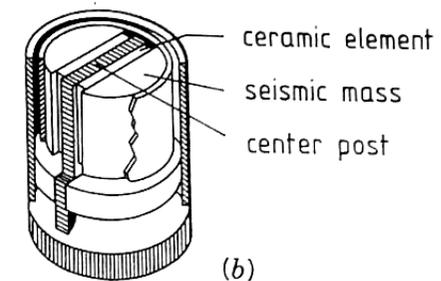
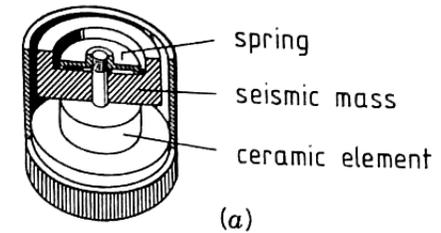
- Variété de montages

- compression ou cisaillement de l'élément sensible

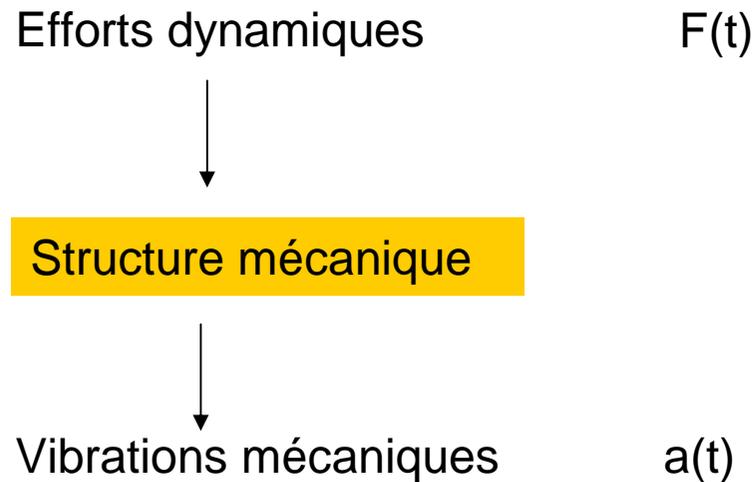
- Equivalent à un oscillateur à 1ddl

- Sur un principe similaire :

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

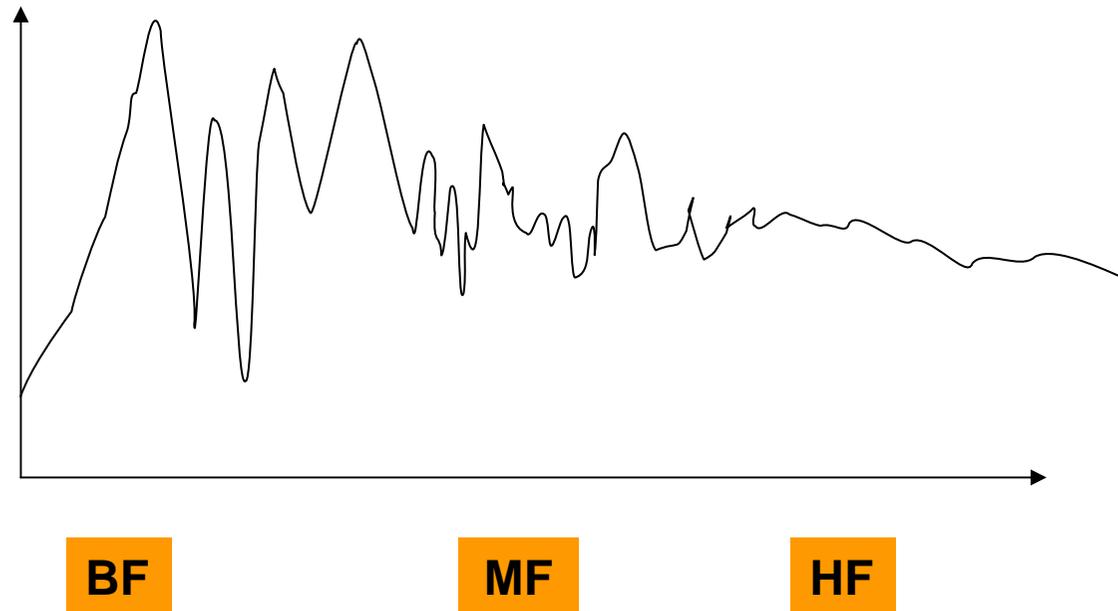


Analyse opérationnelle et analyse modale



- 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

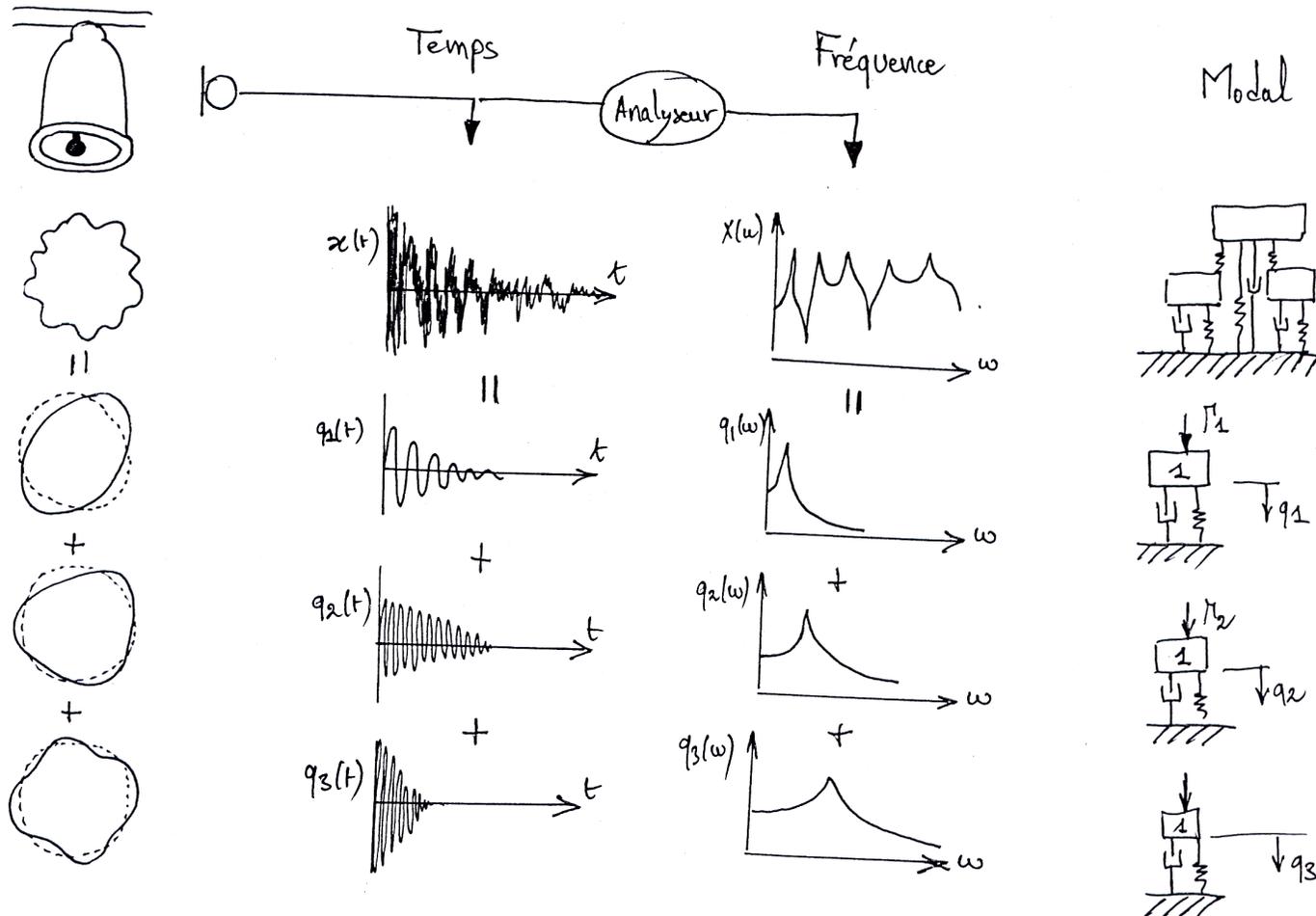


Recouvrement modal
faible
Méthodes modales

Recouvrement modal
important
Méthodes statistiques

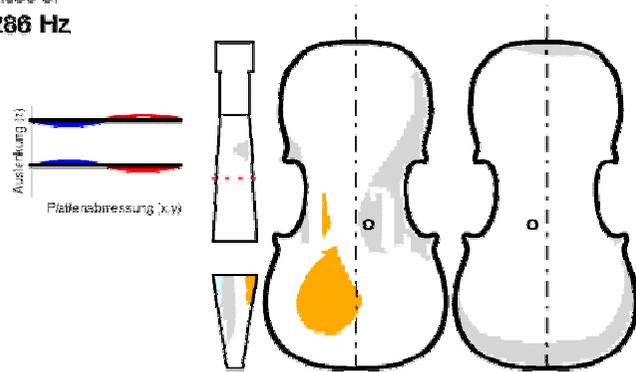
Principe de superposition modale

Réponse d'une structure = somme de contributions modales



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

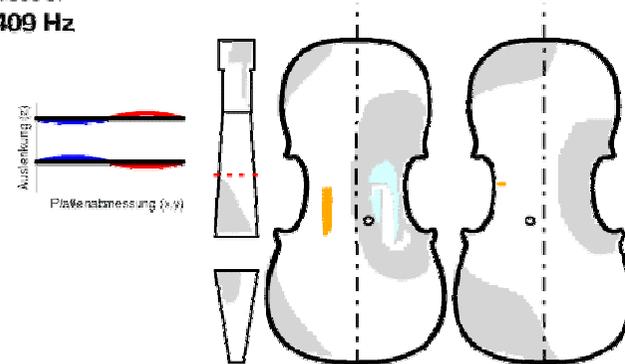
Mode 6:
286 Hz



Helmholtzresonanz (A0)

Stradivari 1712 "Schreiber"

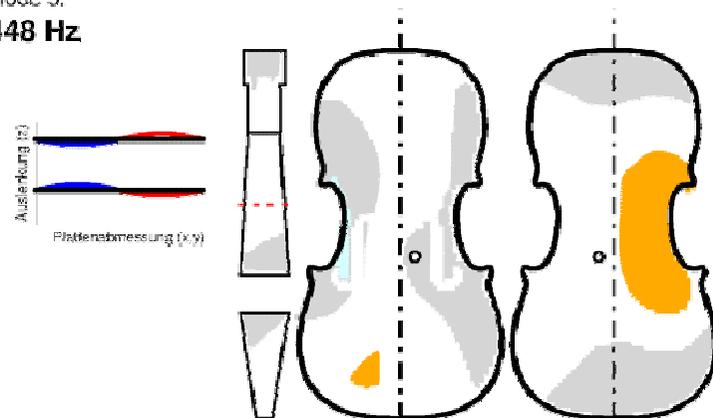
Mode 8:
409 Hz



Torsionsmode (C2)

Stradivari 1712 "Schreiber"

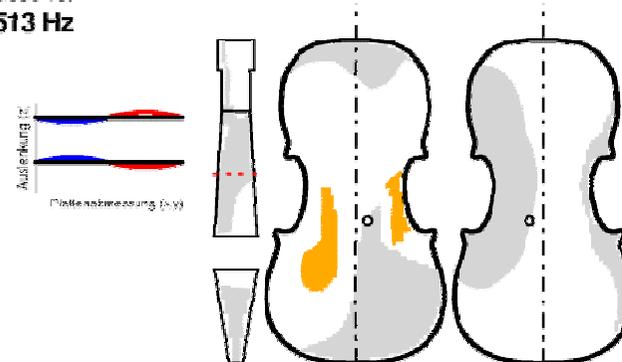
Mode 9:
448 Hz



Corpusmode (T1)

Stradivari 1712 "Schreiber"

Mode 10:
513 Hz



Corpusmode (B1)

Stradivari 1712 "Schreiber"

Exemple d'identification modale sur un batiment

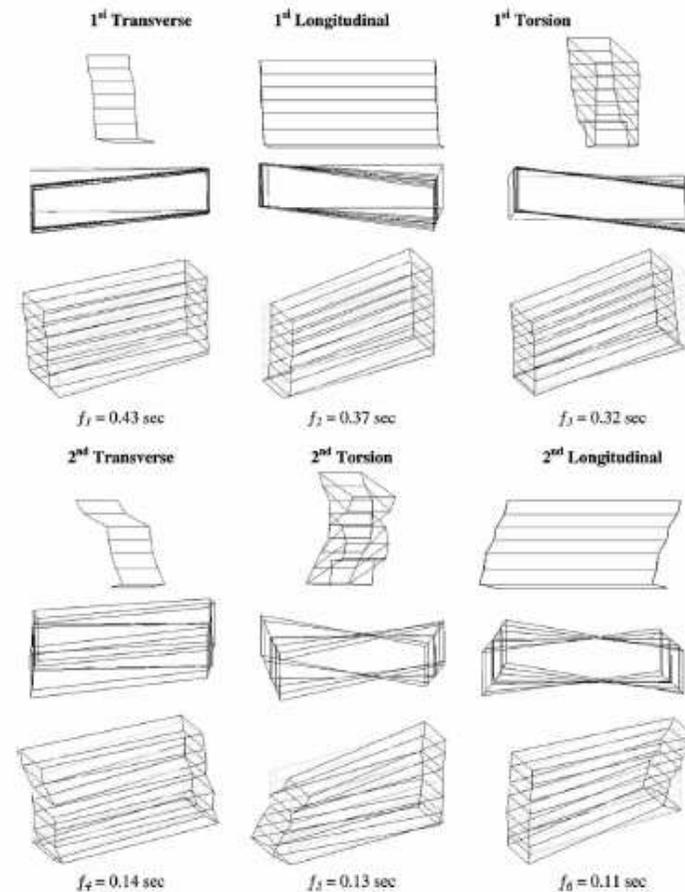


Fig. 6. Elevations, plans, and oblique views of the first six mode shapes of the building obtained experimentally.

C.E. Ventura^{a,*}, W.D. Liam Finn^b, J.-F. Lord^c, 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

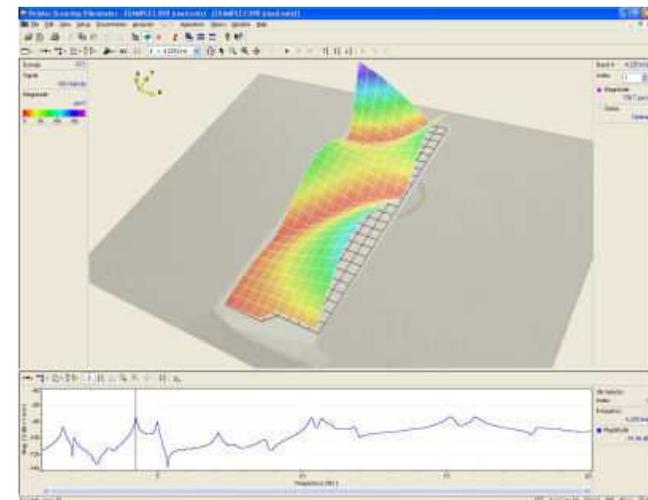
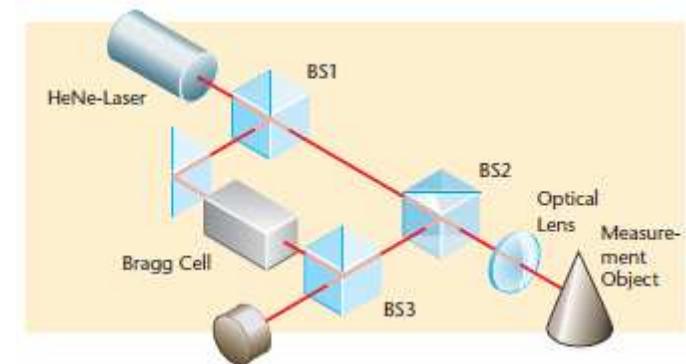
Principe

- 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

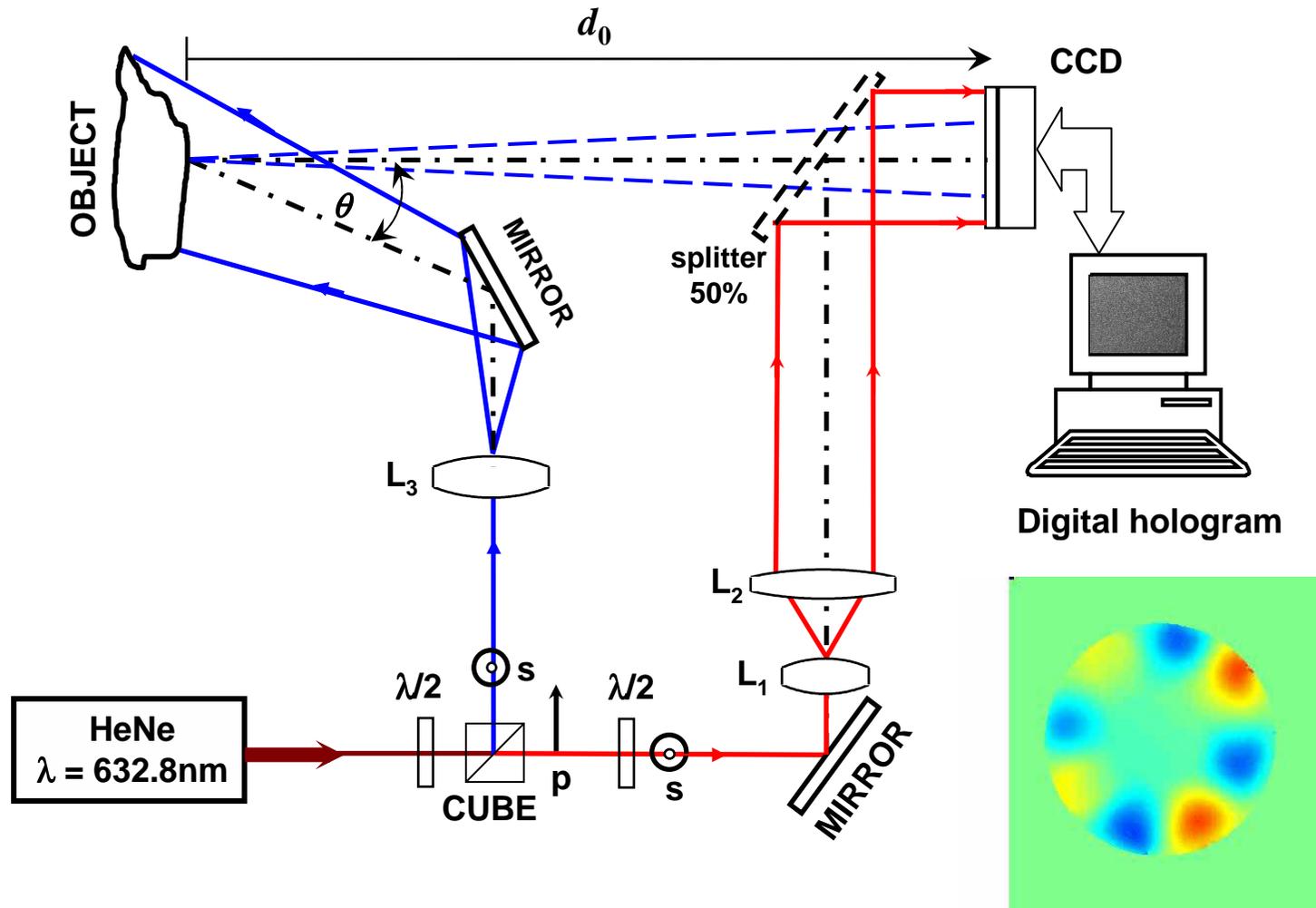
Avantages

- 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



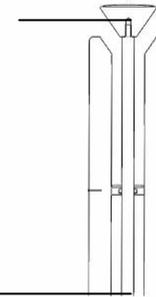
Caractérisation de la transmission d'un bruit solidien

Utilisation d'une station d'écoute solidienne

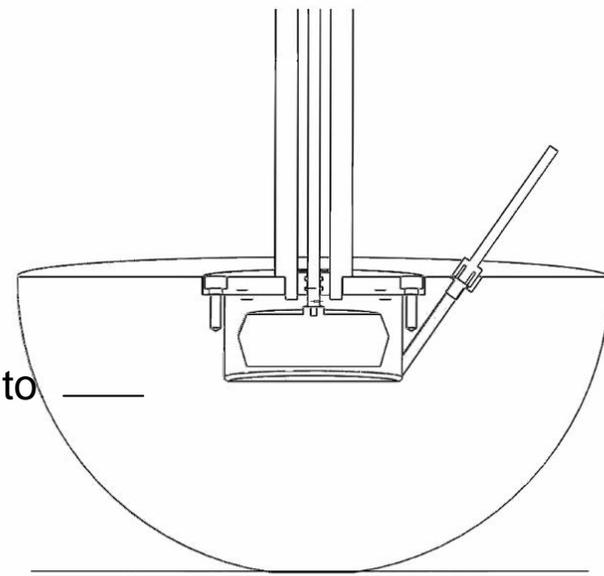
Transmission Vibreur - Tige – cône de contact- peau

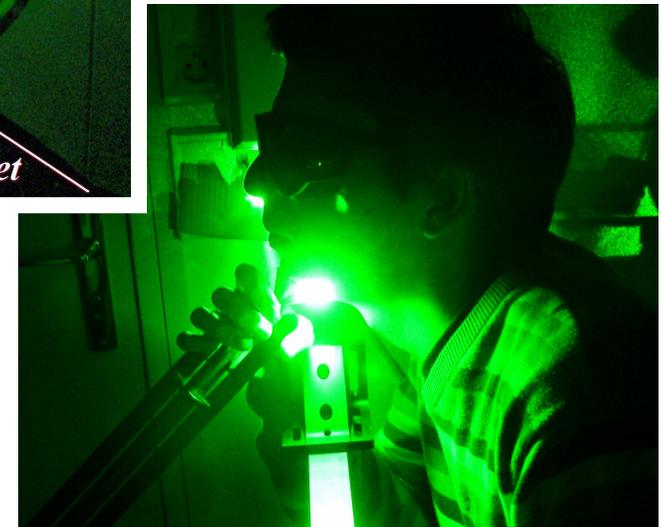
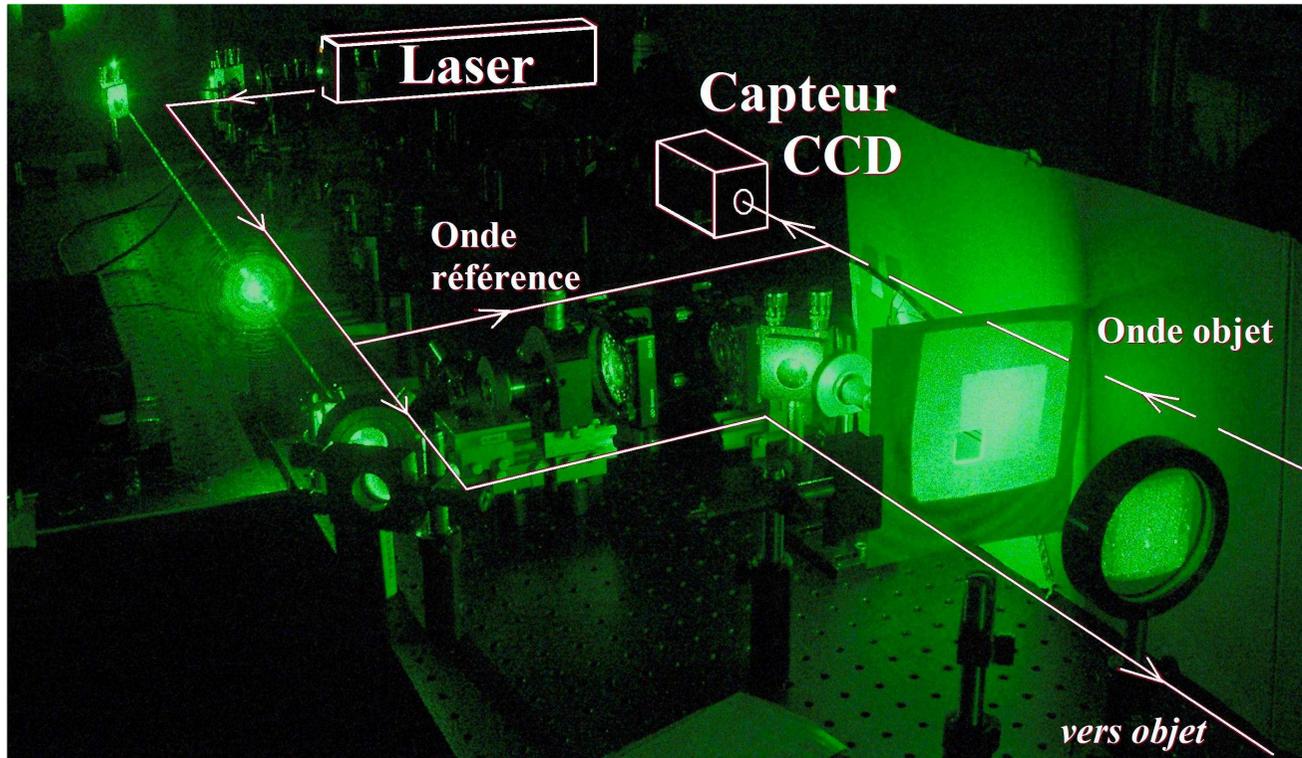


Cône de contact

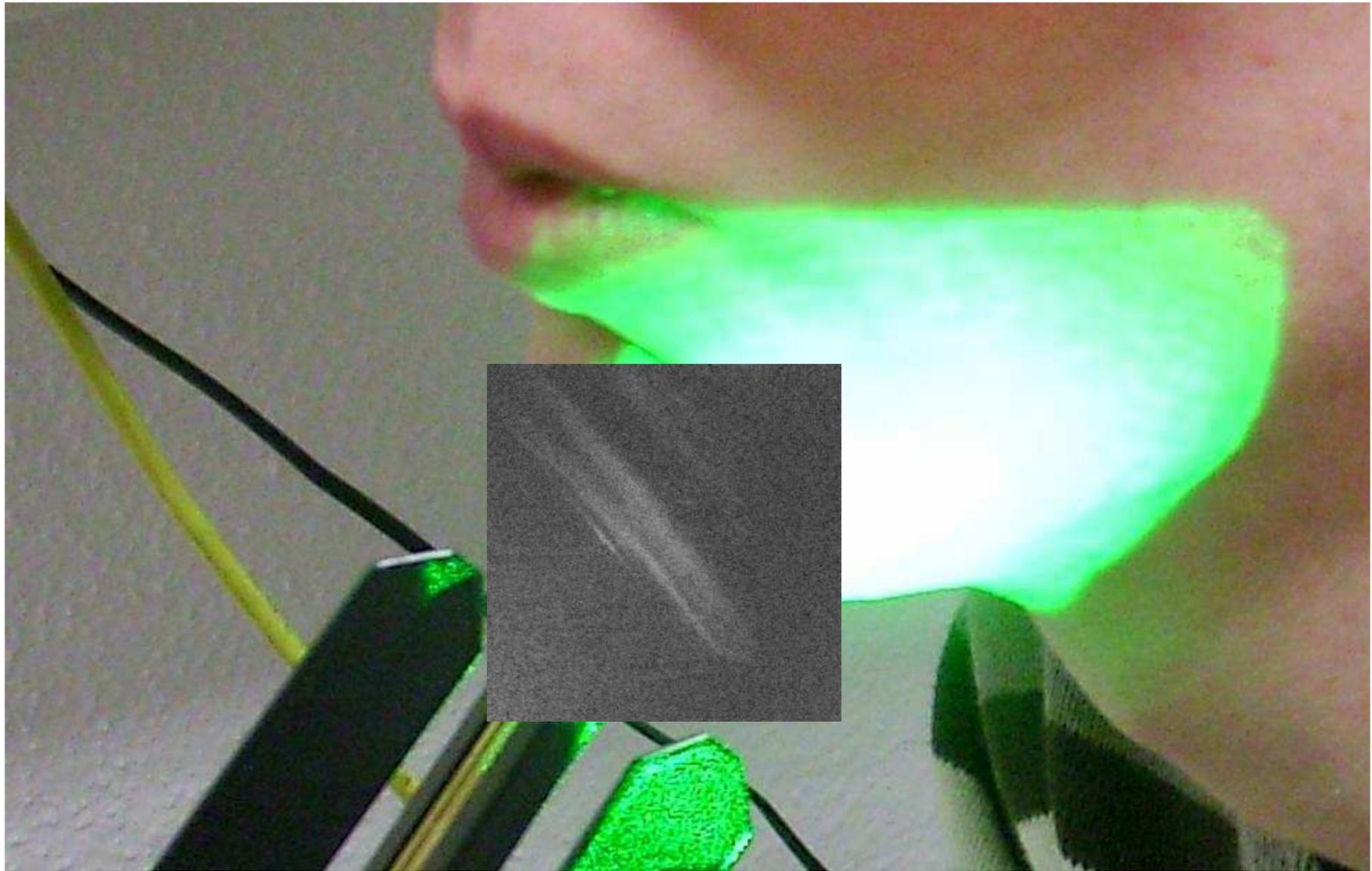


Tige



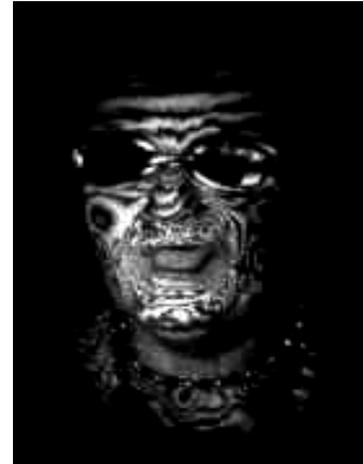


P. Picart et coll.

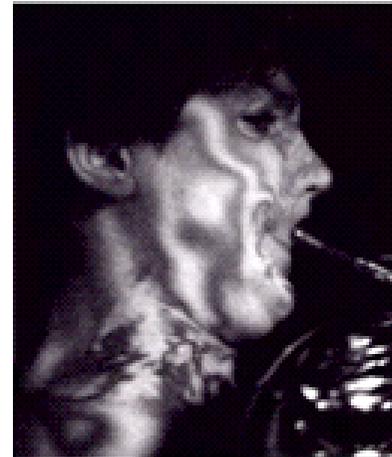


Vibrations du corps humain

- Vibration du visage d'un chanteur d'opéra



- Vibrations d'un corniste



Université de Warwick, Norvège

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.

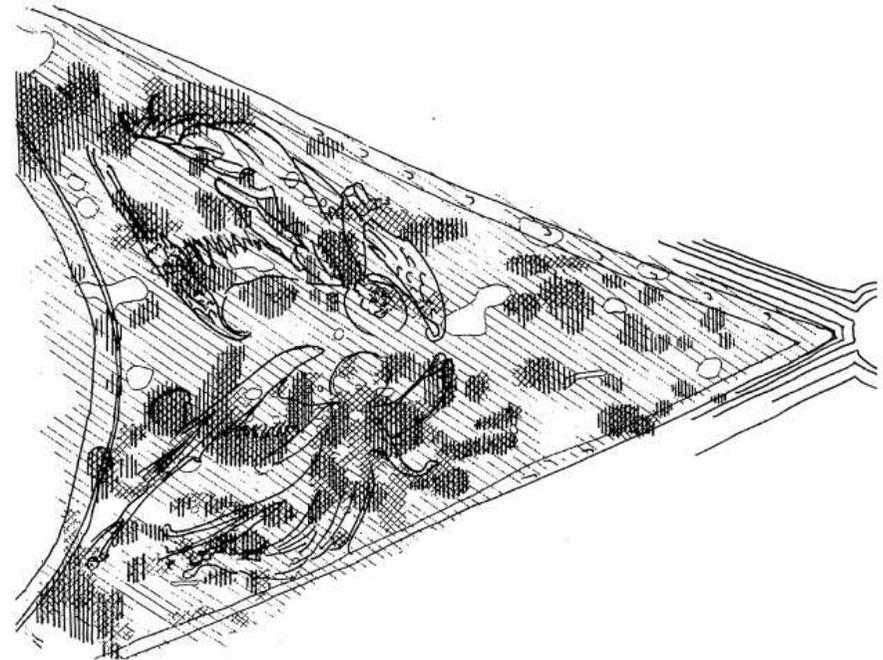


Fig. 8. Exploration map of loose plaster regions in first test section. Wide-spaced hatching from upper left to lower right: bond potentially weakened according to percussion method; narrow hatching from lower left to upper right: definitely loose according to percussion method; vertical hatching: definitely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

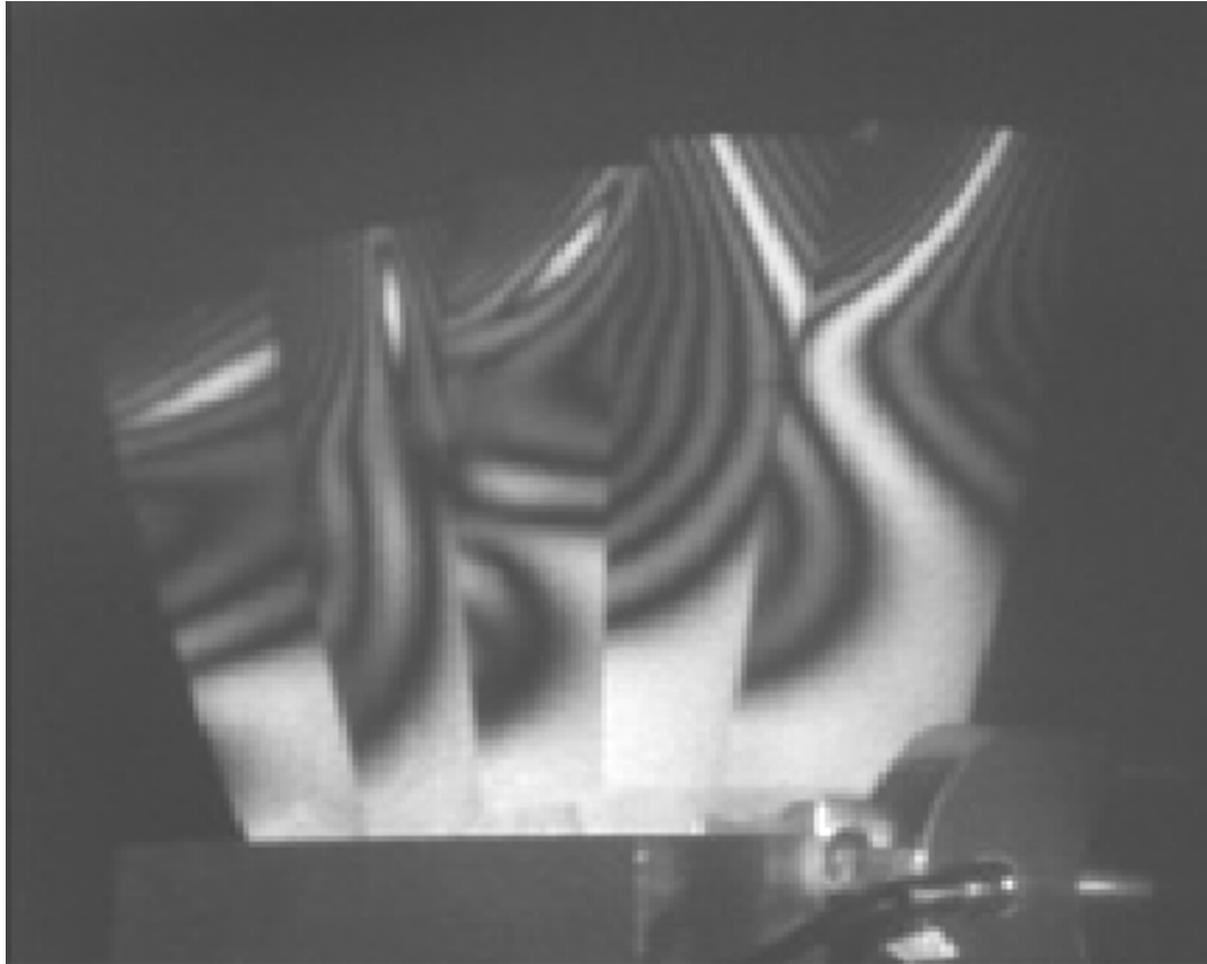


1010 Hz



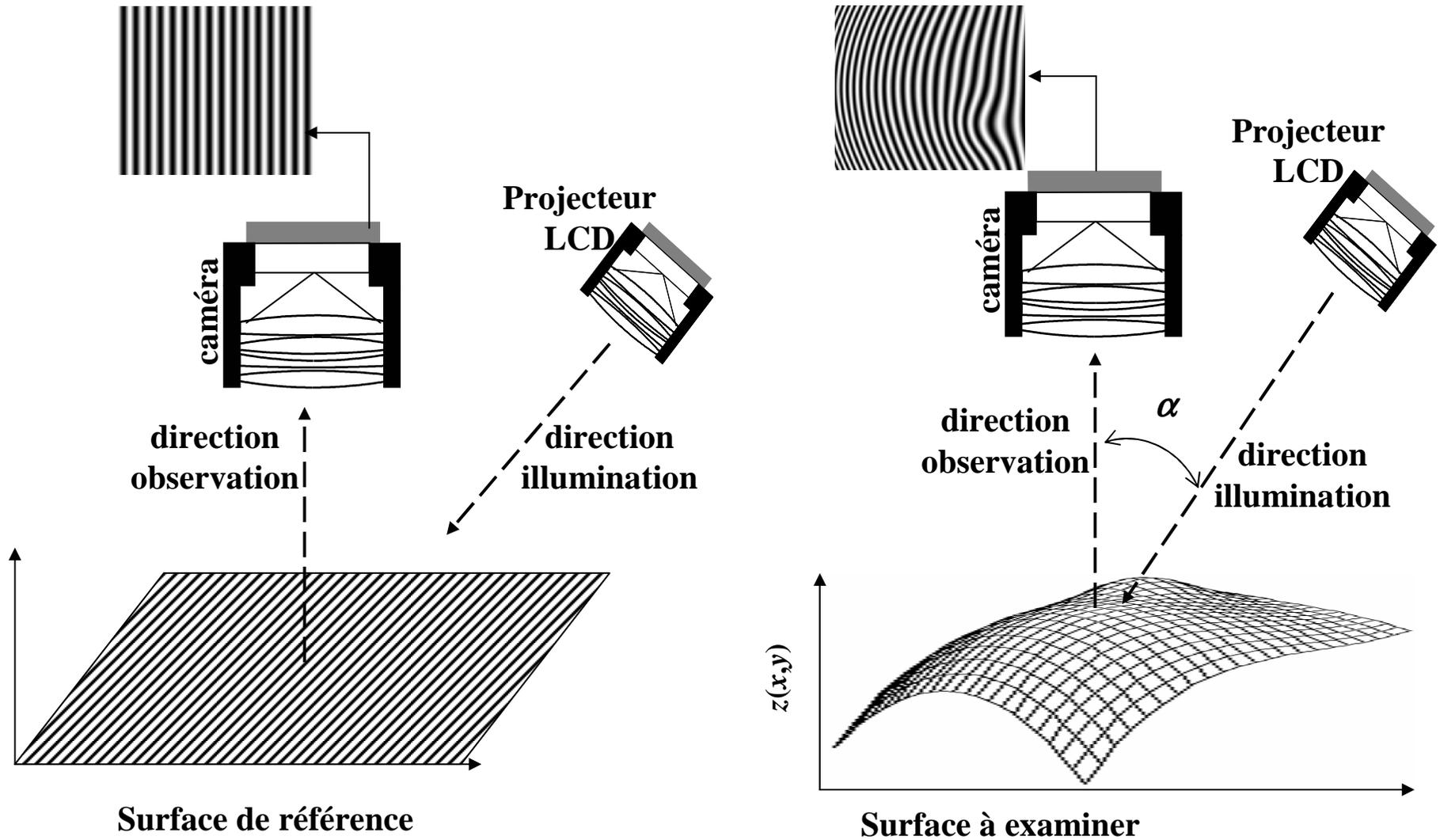
1174 Hz

Holographie à « temps moyenné »



Mode d'une pale de turbine

Projection de lumière structurée : principe



Projection de lumière structurée : application sur un objet pyramidal

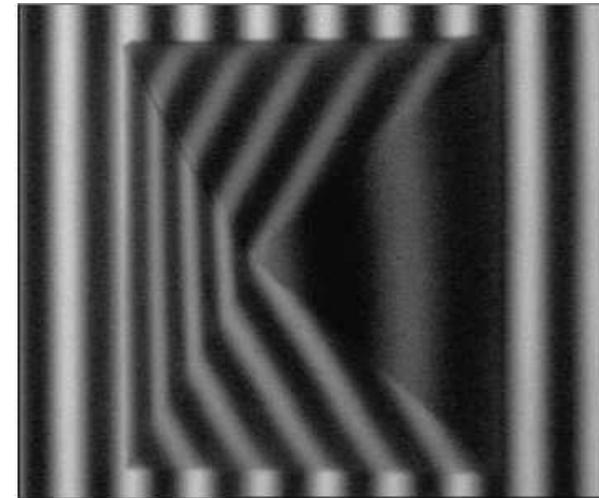
Système de projection de franges

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

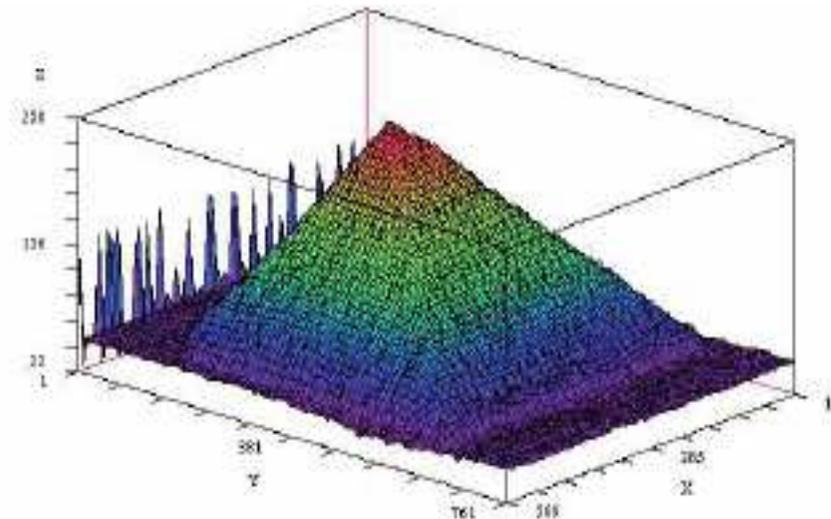


- Résolution : fraction du pas des franges
- Couplage possible avec une caméra rapide
- Contraintes en matière de sécurité moins sèves qu'avec un laser de forte puissance

Observation des franges



Profil de la pièce



Les techniques d'antennerie

Antennerie acoustique :

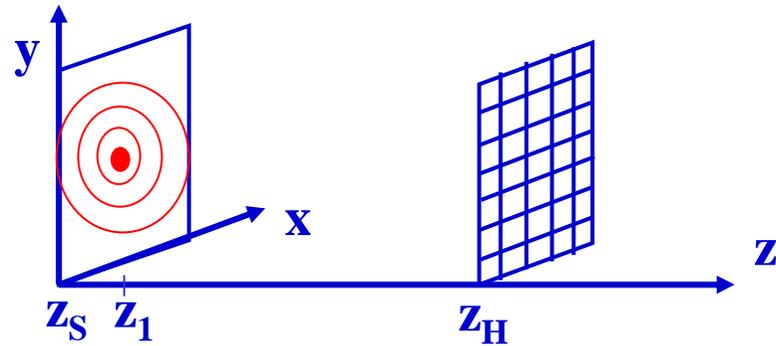
- En champ proche : holographie acoustique
- En champ lointain : formation de voies

Antennerie vibratoire

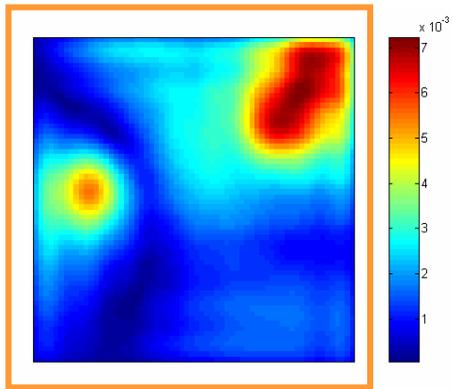
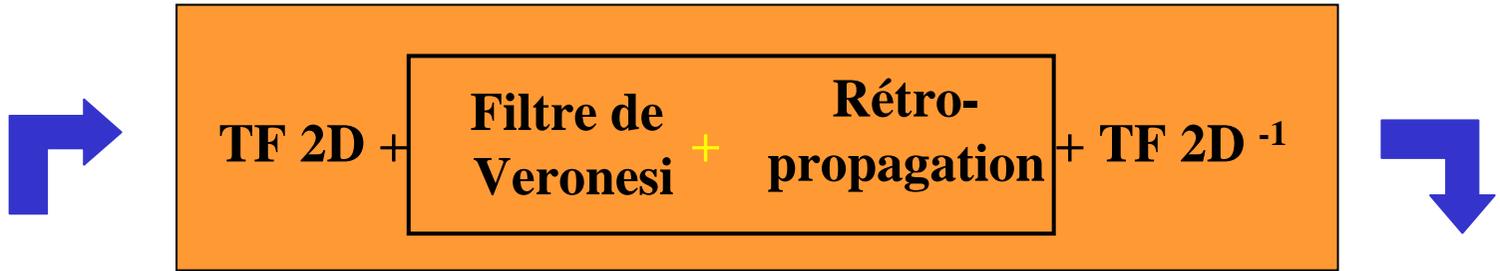
- Reconstruction d'efforts par méthode RIFF

Holographie acoustique de champ proche pour les sources stationnaires

Champ acoustique
acquis sur le plan
 $z=z_H$



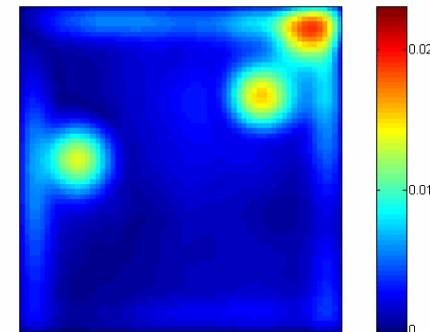
Champ acoustique
reconstruit
sur le plan $z=z_1$



1 champ spatial pour 1 fréquence

Spectre de nombre d'onde

Domaine
espace / fréquence



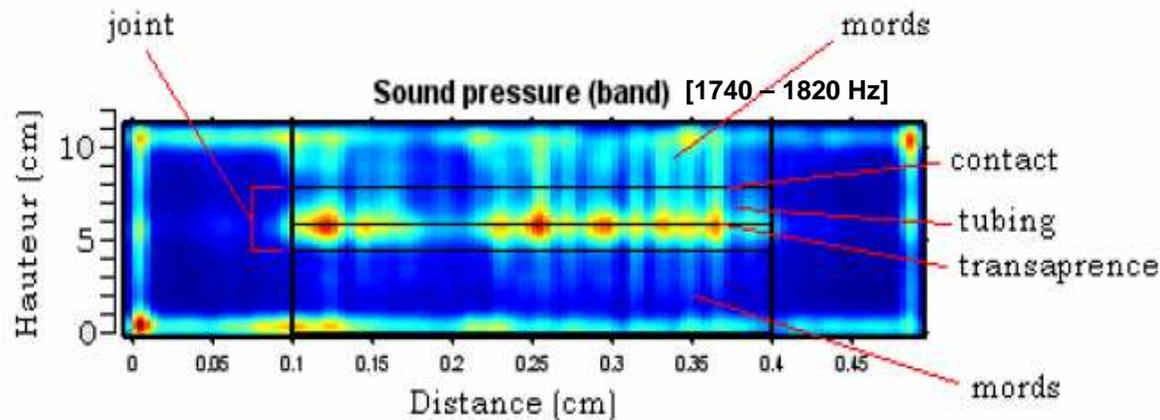
$k_c = 0.6 k_{max}$

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

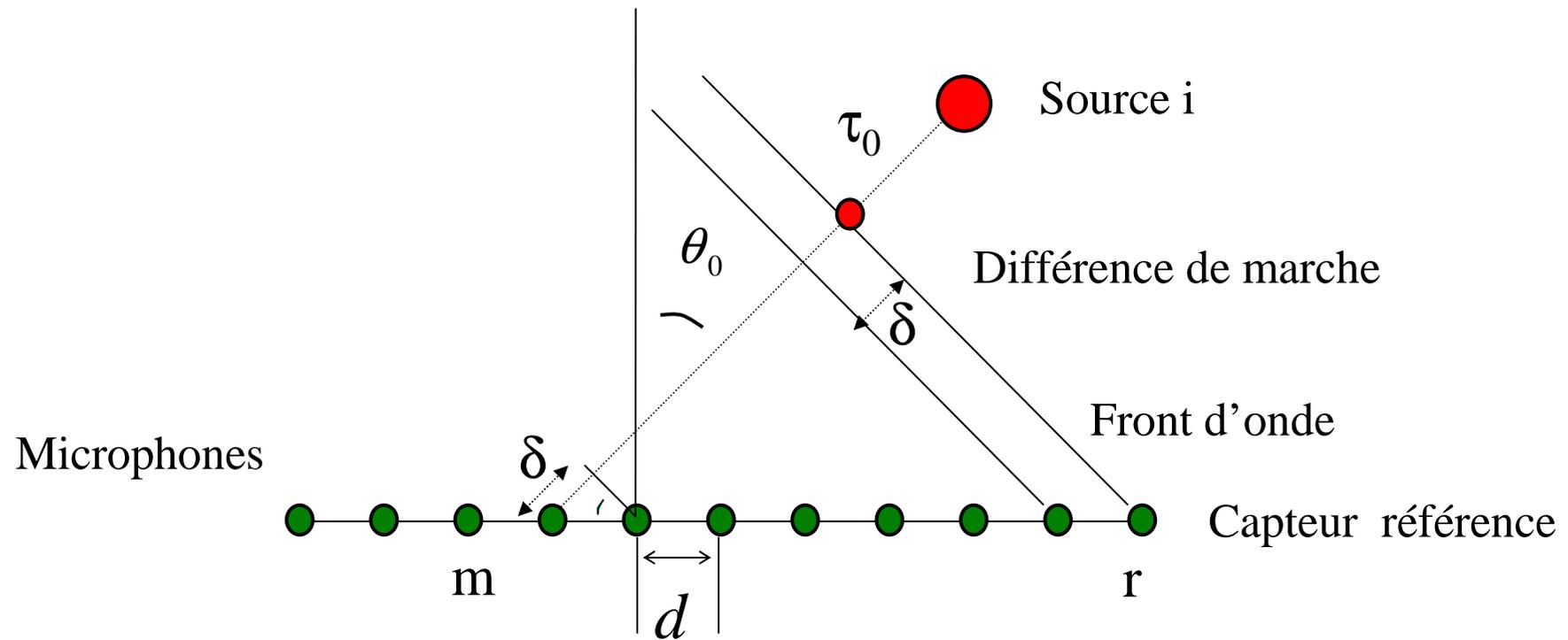
- Entreprise Cooper Standard Automotive
- Transparence acoustique de joints élastomère
- Contact joint –structure
- Tubing (résonance de la cavité du joint)



J.H. Thomas, J.C. Pascal

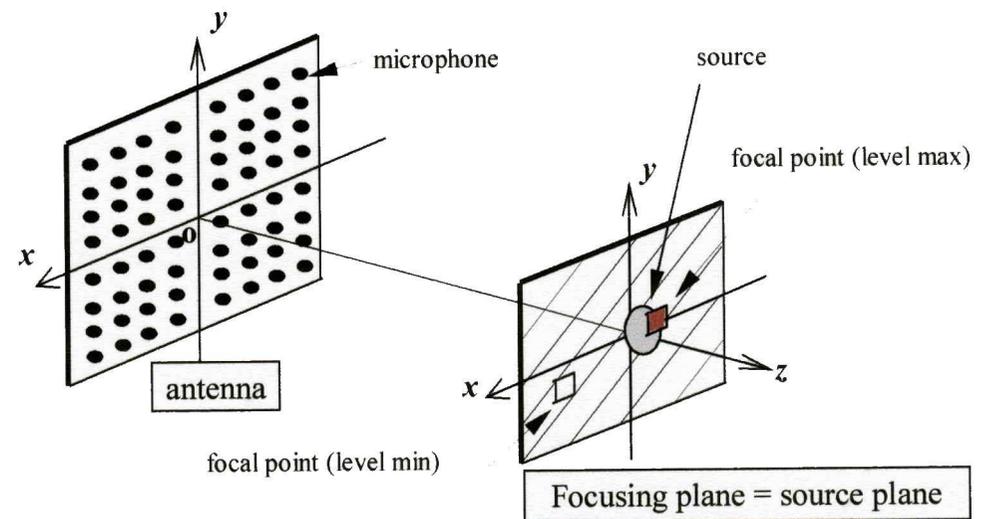
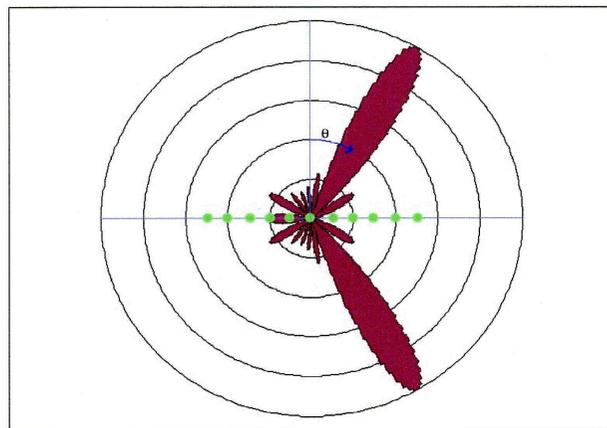
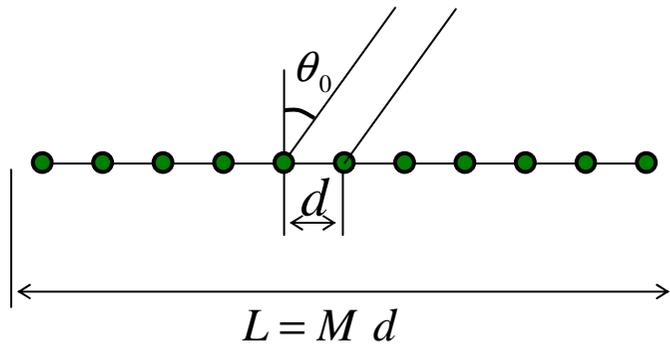


Formation de voies : principe



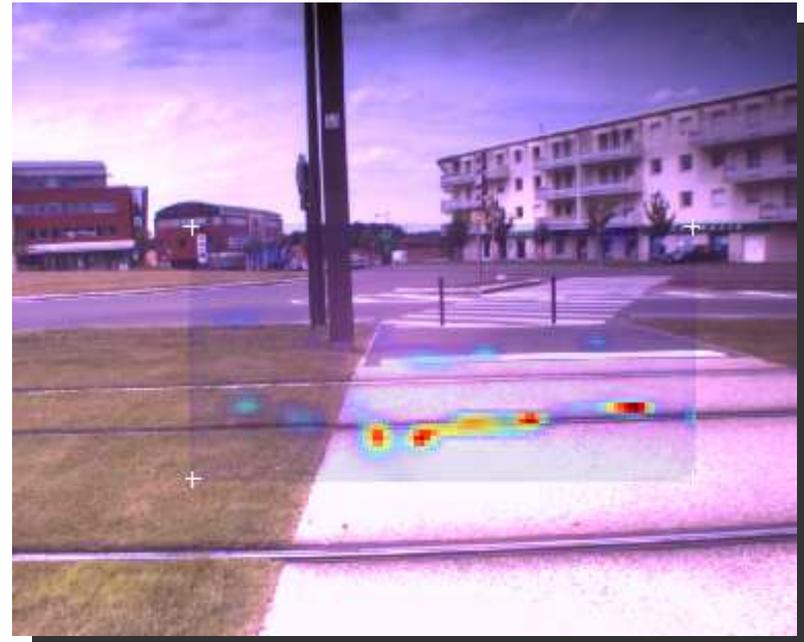
- Hypothèse d'une source monopolaire située en i
- Calcul des signaux vus sur les microphones m compte tenu de leurs déphasages avec un microphone de référence r : les voies sont retardées en fonction de la position du point focal
- Calcul d'un indicateur (somme) en fonction de la direction (réponse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



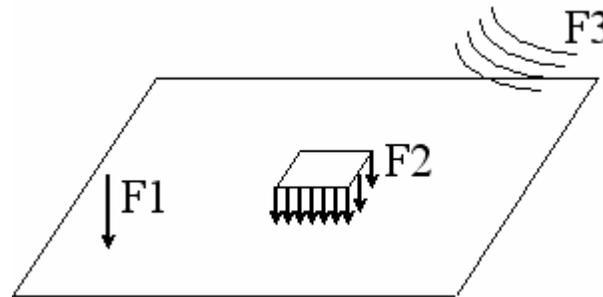
J.H. Thomas, J.C. Pascal, 2008

Antennerie vibratoire : méthode RIFF (Résolution Inverse Fenêtrée Filtrée)

Objectif

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

Caractérisation de source

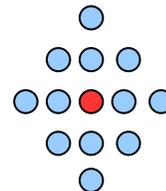


Principe

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

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

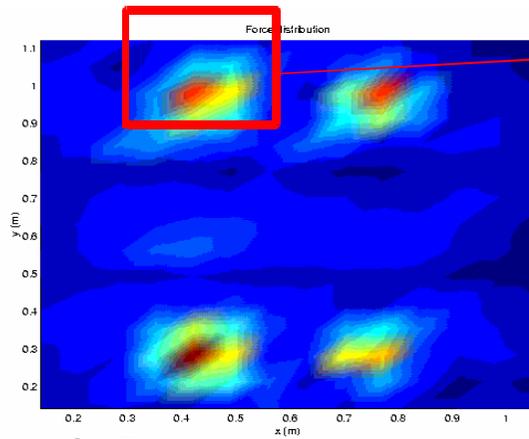
- Différences finies (plaque): 13 points



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

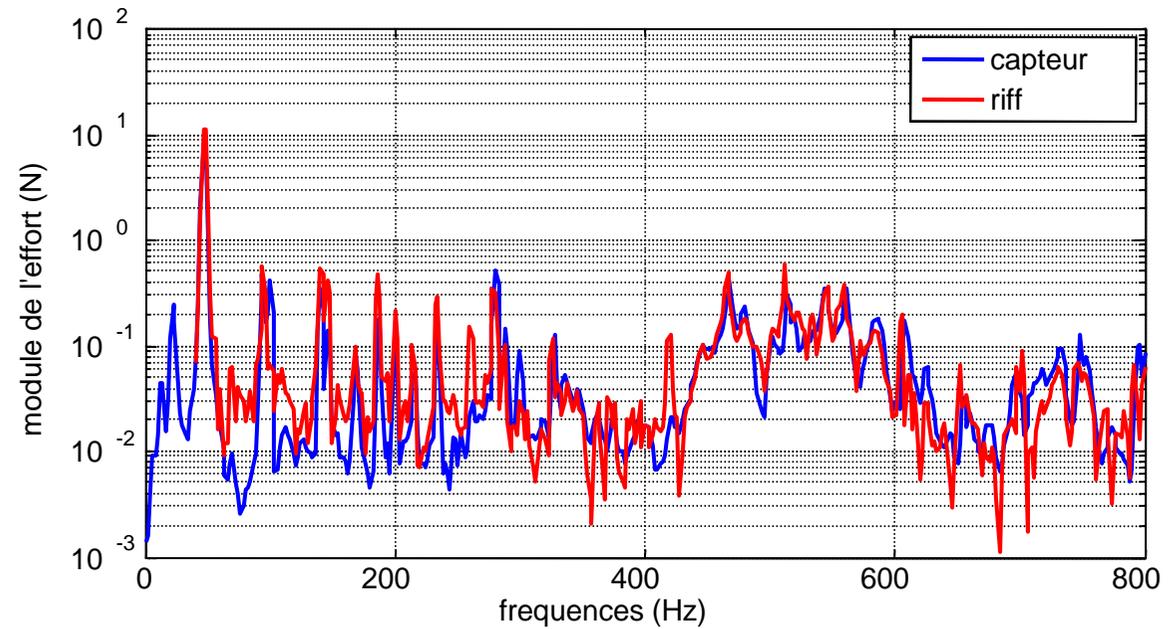
Identification d'efforts transmis par méthode RIFF : exemple

Compresseur (INRS)



C. Pezerat et coll., Lyon

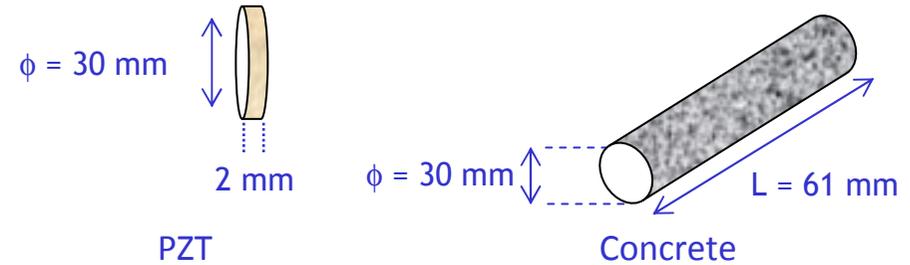
Comparaison capteur - RIFF



Vibrations et controle non destructif : exemple d'un béton

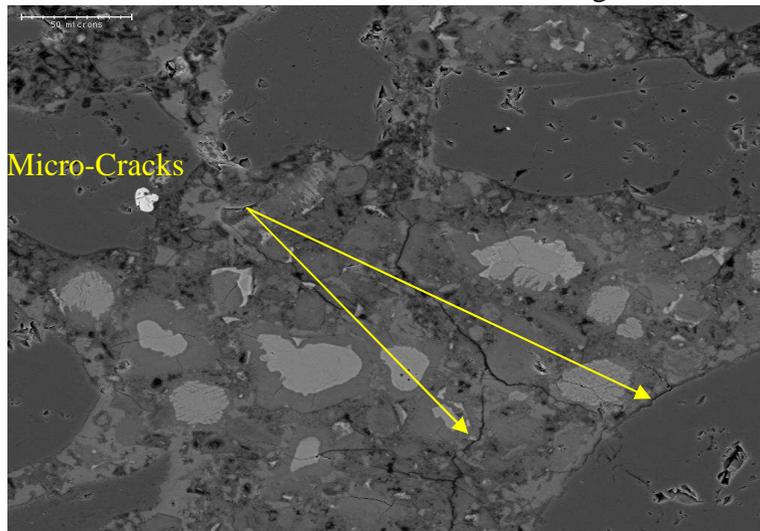
Characteristics of a concrete

- 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



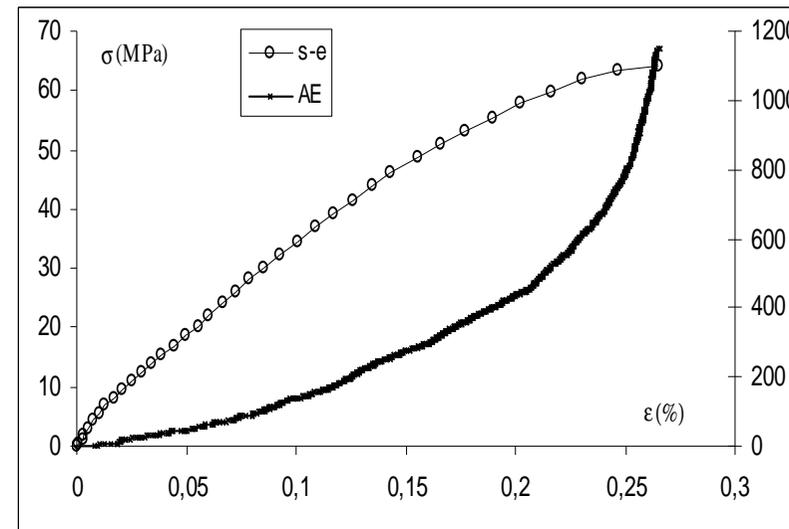
1- Undamaged sample

Existence of Micro-cracks before damage



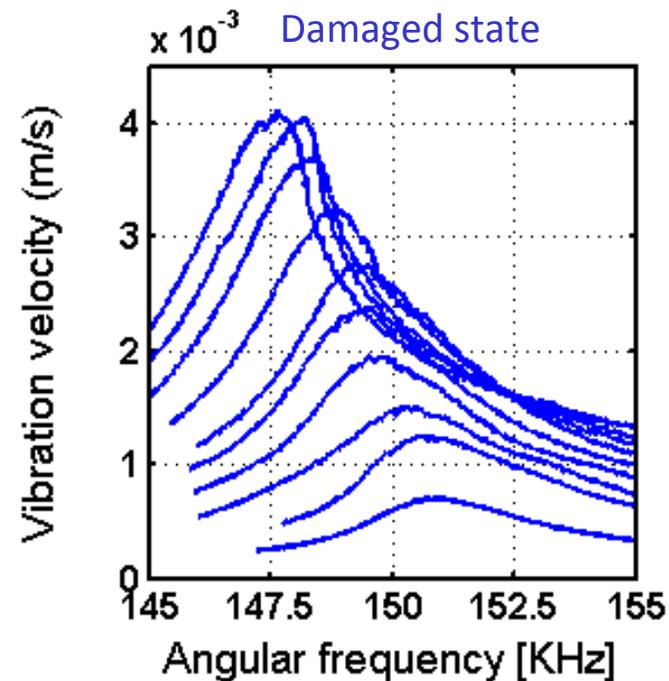
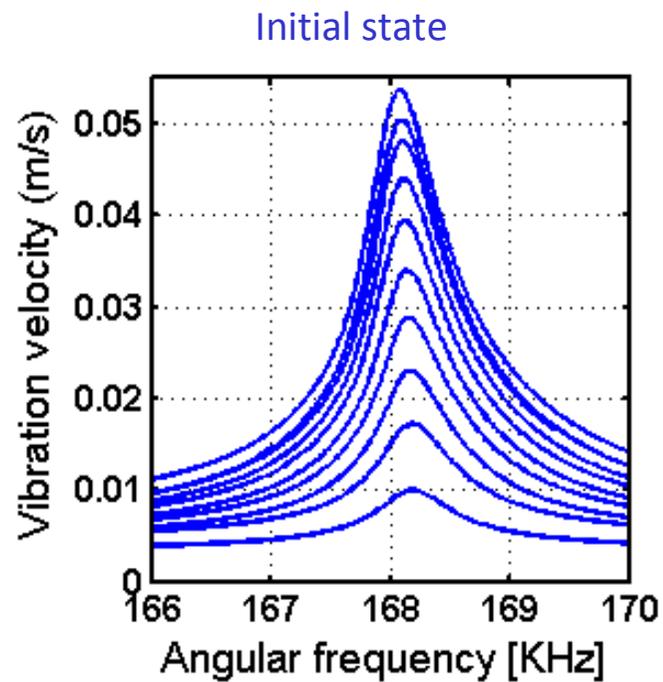
2- Damaged sample

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