

Expertise mécanique des sciages par analyse des vibrations dans le domaine acoustique



**Thèse en mécanique option acoustique
Soutenu par Loïc BRANCHERIAU**

CIRAD Forêt

**Qualité et Valorisation des Bois de Plantation
Montpellier**

Déroulement de l'exposé

- ❑ Utilisation du bois en structure
- ❑ Classement mécanique des sciages
- ❑ Domaines de recherche
- ❑ Mise en œuvre pratique
- ❑ Conclusions et perspectives

Contexte normatif

- ❑ Eurocode 5 : calcul des structures en bois
- ❑ Norme produit : bois massif à usage structurel classé en résistance (EN 338)
- ❑ Norme d'essai : détermination de certaines propriétés mécaniques (EN 408)

- ❑ Exemple d'appartenance à une classe :

C30 (résineux)

Contrainte de rupture à la flexion	f_m	≥ 30	Mpa
Module d'élasticité longitudinal	E_L	≥ 12	Gpa
Masse volumique	ρ	≥ 380	kg/m ³

Contexte industriel

⇒ Processus de classement automatique :

1) Méthode non destructive

Grandeurs physiques x_i

2) Relation statistique \longleftrightarrow Référence
 $F(x_i) = E_L$, $G(x_i) = f_m$ normative

3) Règle d'appartenance
à une classe (EN 338)

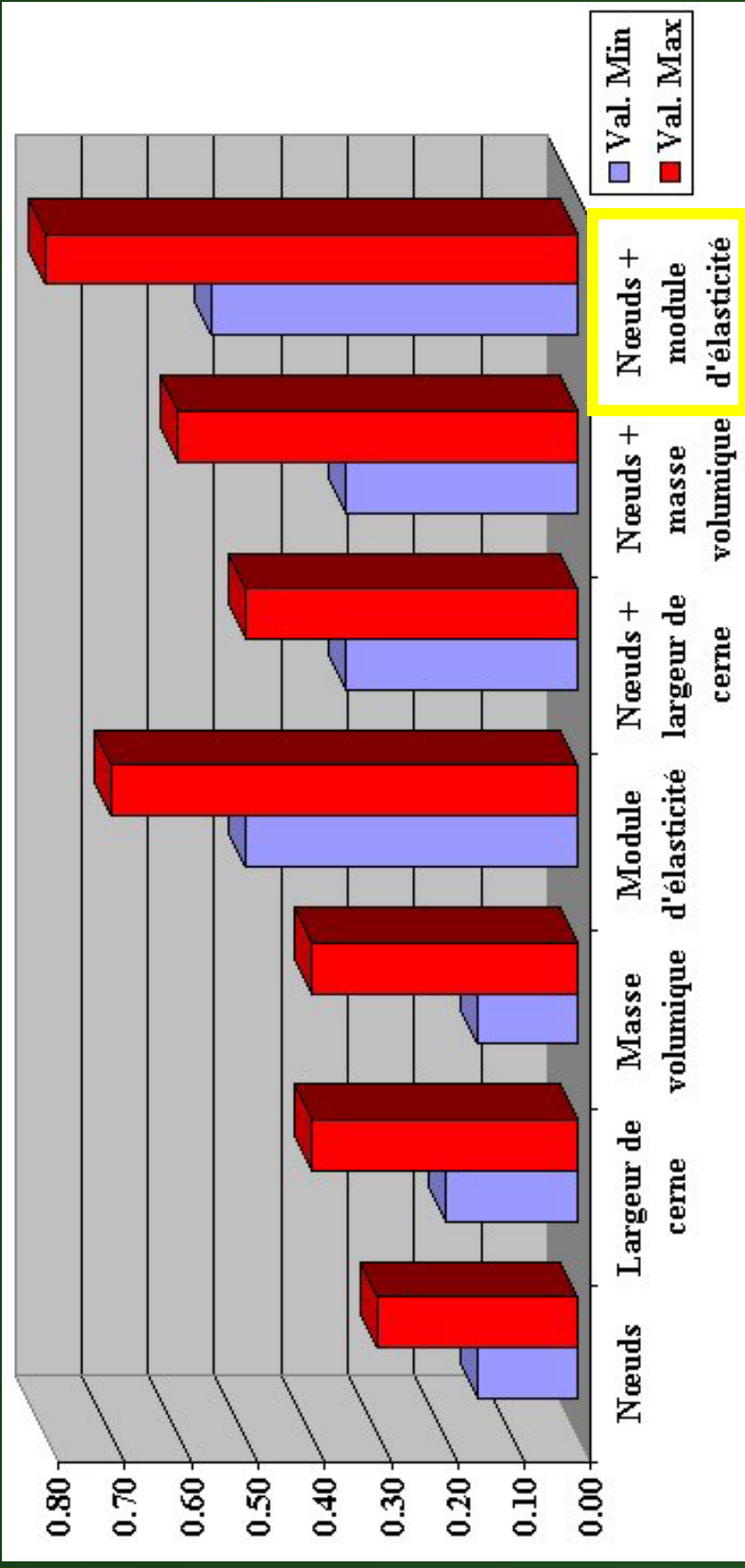
Objectifs : classement rigoureux des sciages

- Pratiques :
 - ✓ Evaluation fiable de E_L et f_m
 - ✓ Possibilité de détecter les défauts
- Scientifiques :
 - ✓ Dynamique des poutres
 - ✓ Synthèse musicale

Grandeurs physiques ND ?

R^2 de la relation avec f_m

[L. Boström, 1999]



Domaines physiques pertinents pour l'END du bois ?

[L. Boström, 1999]

Méthodes	Grandeurs physiques
Flexion mécanique	Module E_L
Rayonnements électromagnétiques	
Vision (caméra)	Dimensions en surface
Thermographie infrarouge	
Micro ondes	Masse volumique
Rayons X, γ	
Vibrations mécaniques	
Ondes ultrasonores	Module E_L
Ondes acoustiques	Module E_L

Domaines de recherche

☐ Physique :

✓ Dynamique des poutres

✓ Poutres singulières

✓ Poutres homogènes
viscoélastiques

✓ Synthèse musicale

✓ Détection des
singularité

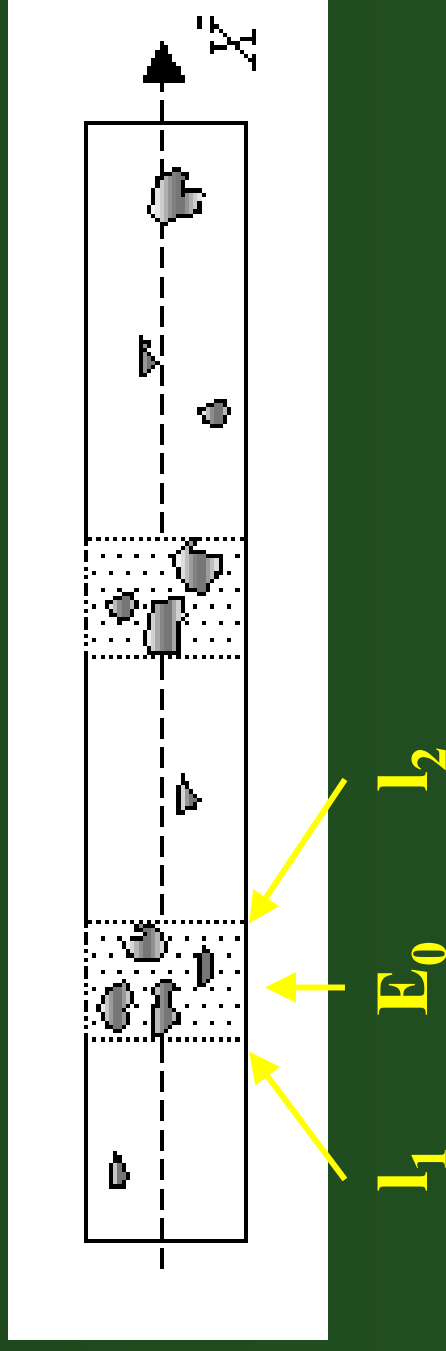
☐ Orientations :

Dynamique des poutres singulières

- Description du problème direct
 - ✓ Utilisation du modèle de Bernoulli
 - ✓ Notion d'élément faible

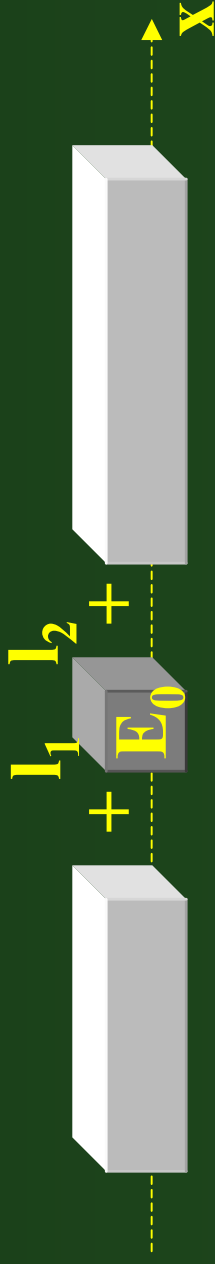
Il correspond à une analogie mécanique de comportement.

Exemple :



Dynamique des poutres singulières

□ Solution du problème direct

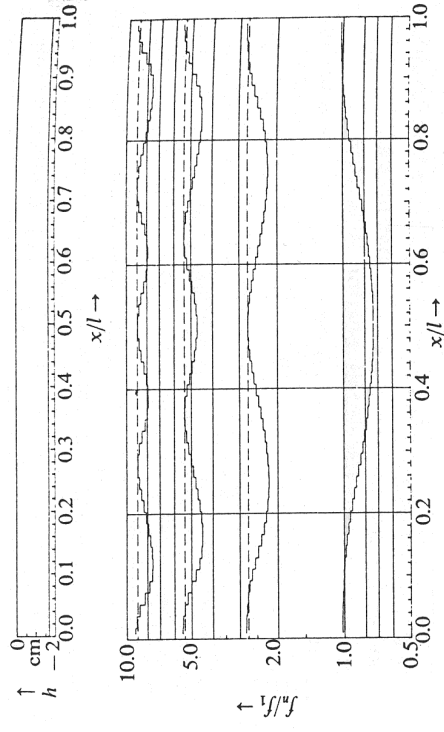
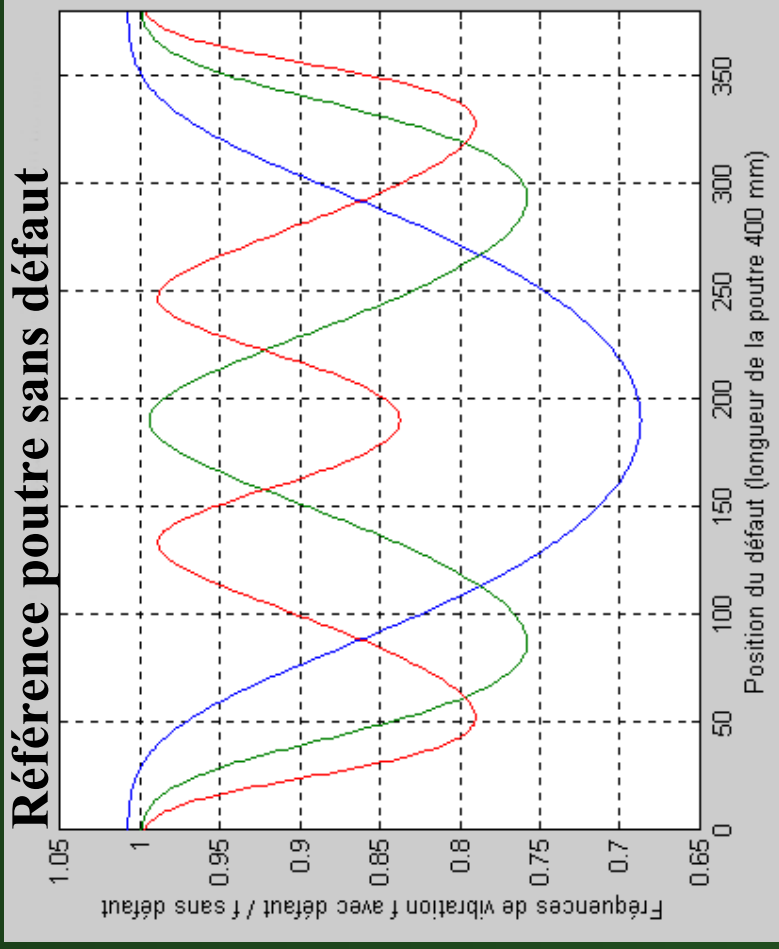


- ✓ Milieu homogène : équation de propagation classique
- ✓ Interface : exprimer la continuité des grandeurs physiques (déplacement, déviation, effort, moment)
- ✓ Conditions aux limites : vibrations naturelles

⇒ Fréquences propres de vibration
longitudinales et transversales

Dynamique des poutres singulières

□ Exemple d'application pratique \Rightarrow le marimba



[Fletcher, 1991]

Dynamique des poutres singulières

- Description du problème inverse
Formulation mathématique du problème

Pb. Direct :

$$F(Z, X) = Y$$

Fréquences

Géométrie / Elt. faible

Pb. Inverse :

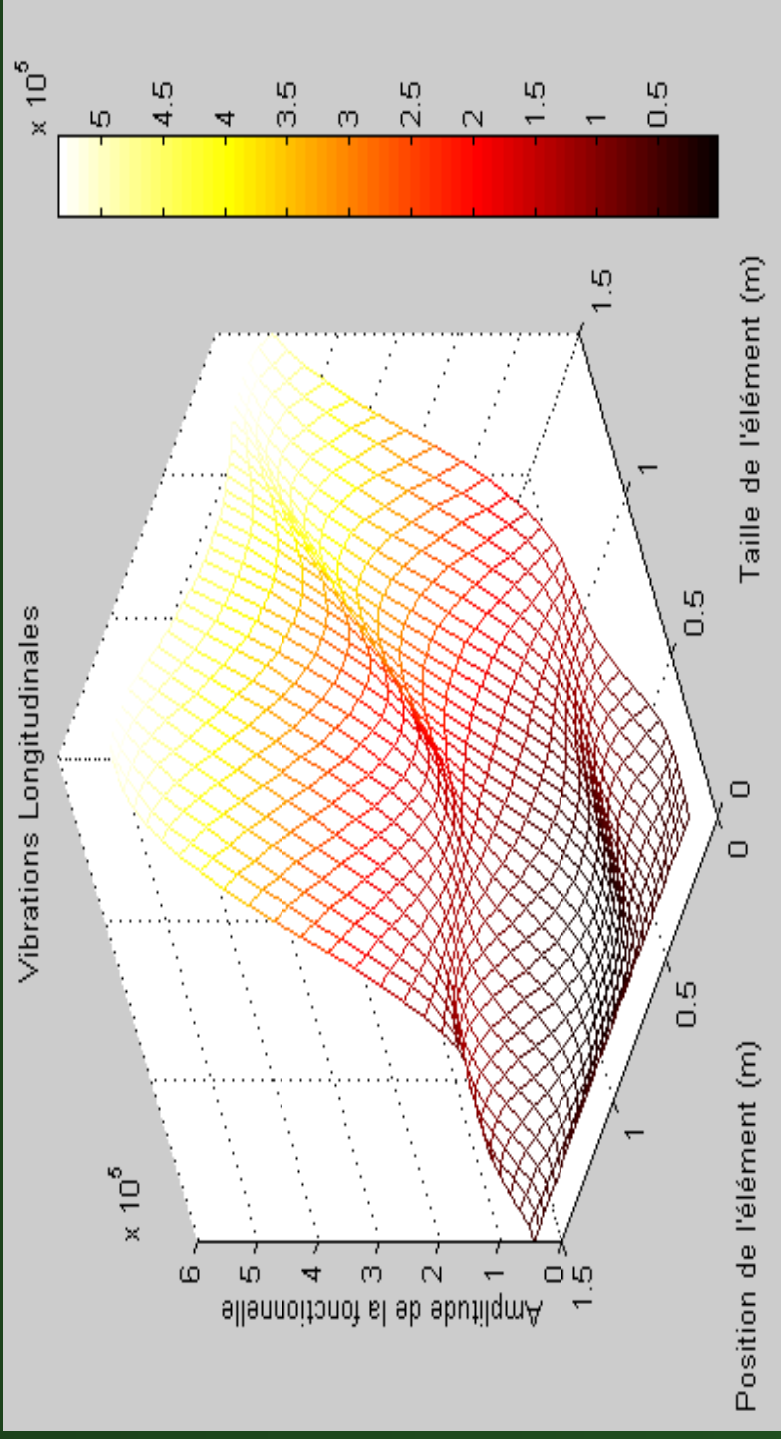
$$\text{Trouver } X_{opt} \text{ tel que : } \begin{cases} f(X_{opt}) = \min\{f(X)\} \\ G_1(X_{opt}) \leq 0 \\ G_2(X_{opt}) = 0 \end{cases}, \text{ avec } \begin{cases} X \in R^n \\ f(X) : R^n \rightarrow R \end{cases}$$

Ecart quadratique

$$f(X) = \sum_k (y_k - F_k(Z, X))^2$$

Dynamique des poutres singulières

- Solution du problème inverse
 - ✓ Cartographie du domaine d'étude, convexité ?



Dynamique des poutres singulières

- ✓ Performance de la méthode choisie
- Solution optimale indirecte \Leftrightarrow Solution directe ?
Problème bien posé ?
- Simulation numérique

Exemples de résultat :

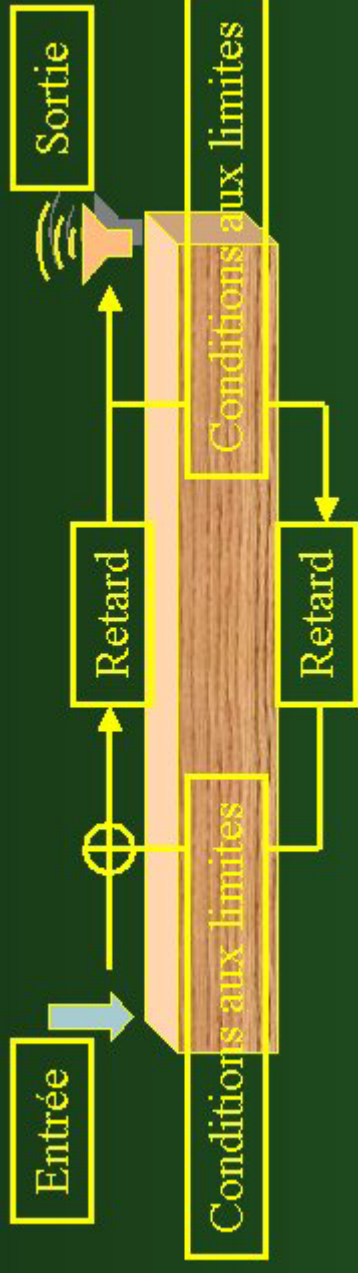
N°	Ecart relatif						Val.
	$\Delta E0$	%	$\Delta I1$	%	ΔT	%	
2	43,8		22,9		55,4	0,000	
7	0,4		22,2		0,9	0,000	
8	0,0		0,0		0,0	0,000	

Vibrations longitudinales

Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

□ Le modèle guide d'onde acoustique

- ✓ Synthèse musicale : J.O. Smith (1980)



$$T(\omega) = \frac{e^{-ikL}}{1 - C_0 C_L e^{-2ikL}}$$

- ✓ Cas particulier d'un retard pur :
⇒ homogène, élastique, unidimensionnelle

Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

- ✓ Possibilité unifier :
 - Modèles mécaniques et Modèles guide d'onde
- ✓ Exemple : solution exacte au modèle de Timoshenko
 - Filtre de retard, k ?

Relation de dispersion :

$$k = \sqrt{\frac{\rho\omega}{2E_L}} \sqrt{\omega^2 \left(1 + \frac{E_L}{KG_{LT}}\right)^2 - 4 \left(\frac{E_L}{KG_{LT}}\omega^2 - \frac{E_LS}{\rho I_{GR}}\right) + \omega \left(1 + \frac{E_L}{KG_{LT}}\right)}$$

- Equation des fréquences ?
 - Conditions aux limites :
 - Module de $T(\omega)$ maximum :

$$C_0 = C_L = -i$$

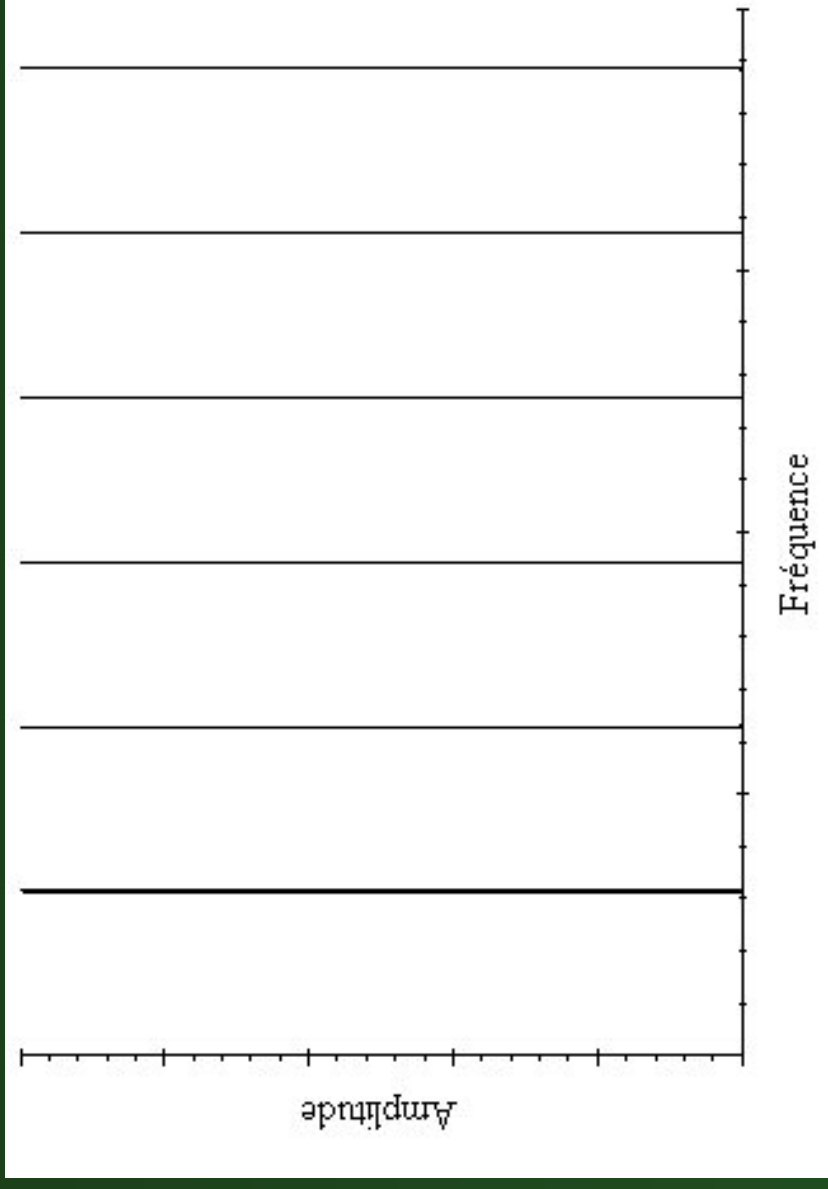
$$k(\omega_n)L = (2n+1)\frac{\pi}{2}$$

Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

✓ Représentation spectrale :

Graphe du module
de la fonction
de transfert

$$|T(\omega)| = \frac{1}{2 \cos(kL)}$$

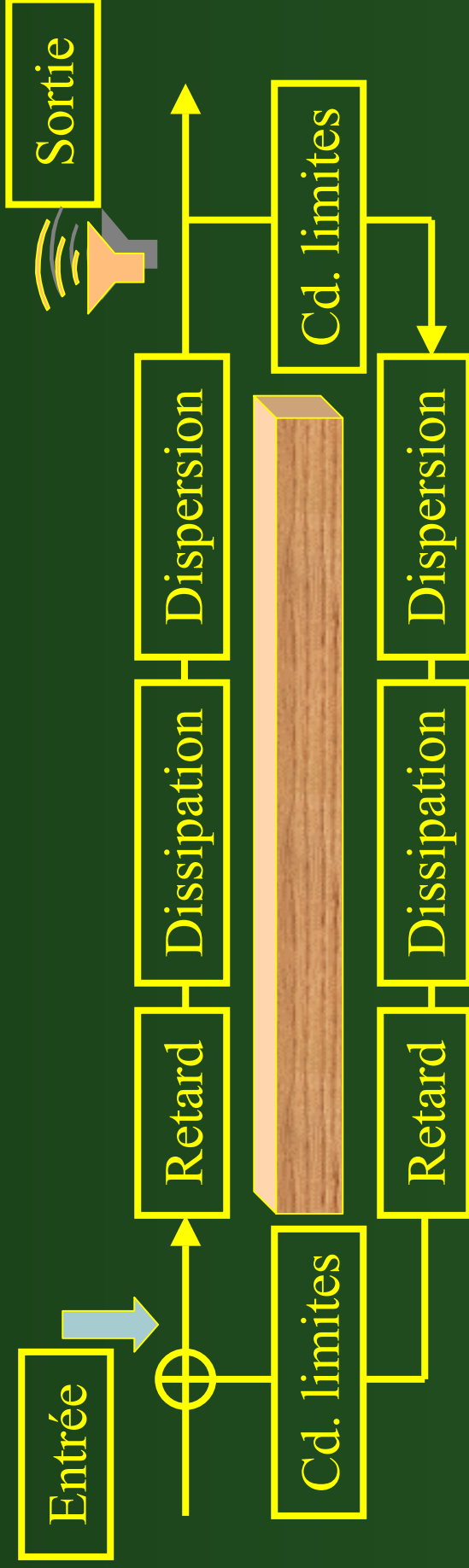


Vibrations transversales

Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

□ Un modèle guide d'onde acoustique avec perte (viscosité), problème direct

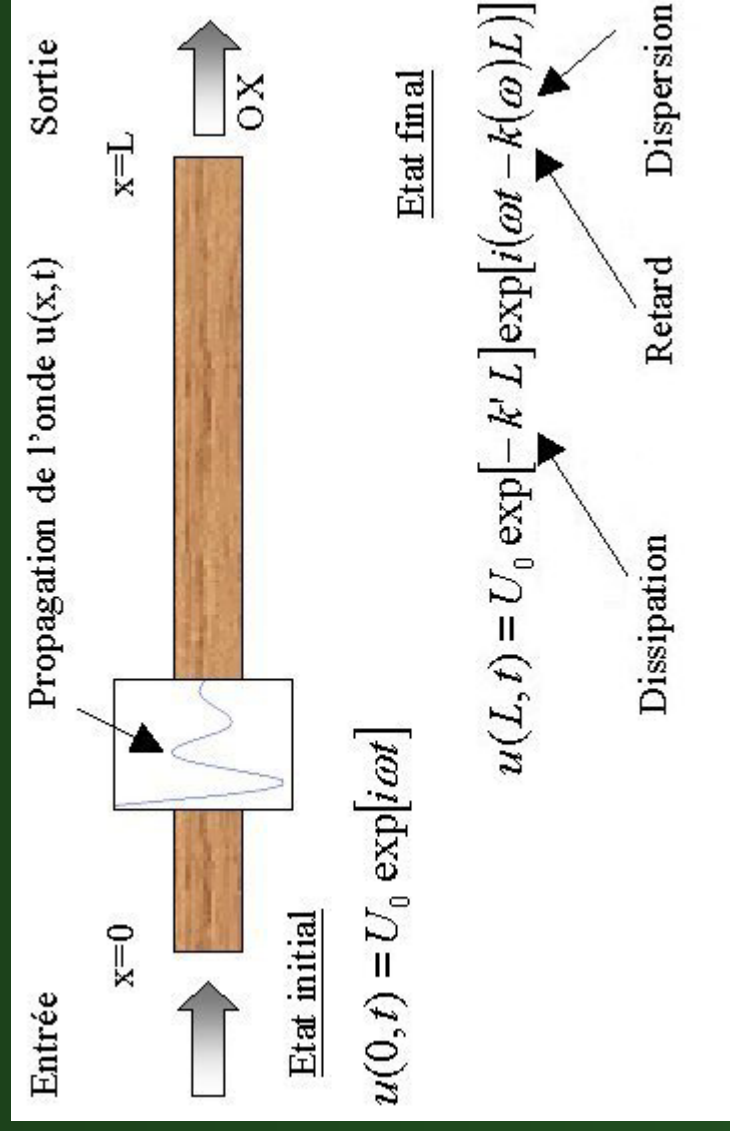
✓ Phénomènes physiques :



Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

✓ Prise en compte des phénomènes physiques

⇒ Un nombre d'onde complexe : $k''(\omega) = k(\omega) - ik'(\omega)$



Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

- ✓ Construction du modèle en vibrations longitudinales
- Hypothèses simplificatrices

Frottement interne faible [Norimoto, 1985]

$$f_n \approx \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E_L}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{1 + \beta \omega^2}}^4 \sqrt{\frac{1 + \tau_\sigma^2 \omega^2}{1 + \tau_\varepsilon^2 \omega^2}}$$

Expression classique

Déplacement latéraux de matière
Rayleigh

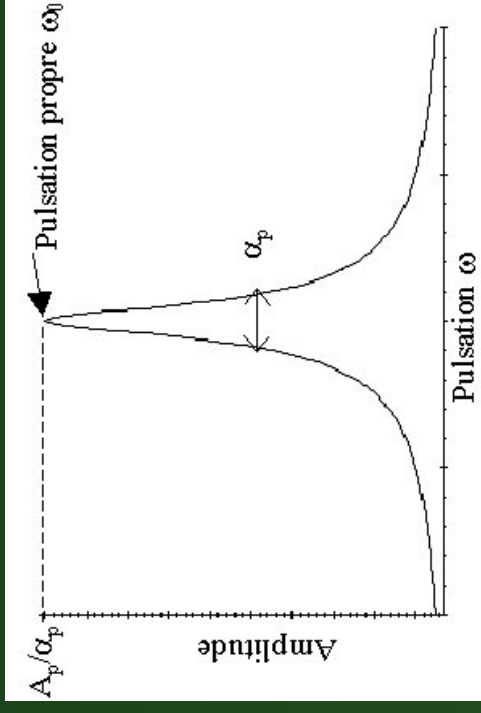
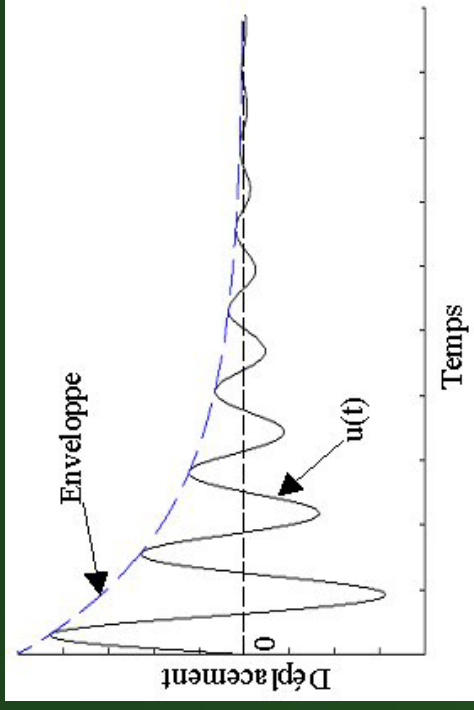
Viscosité
Zener

Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

□ Description et solution du problème inverse

Synthèse additive :

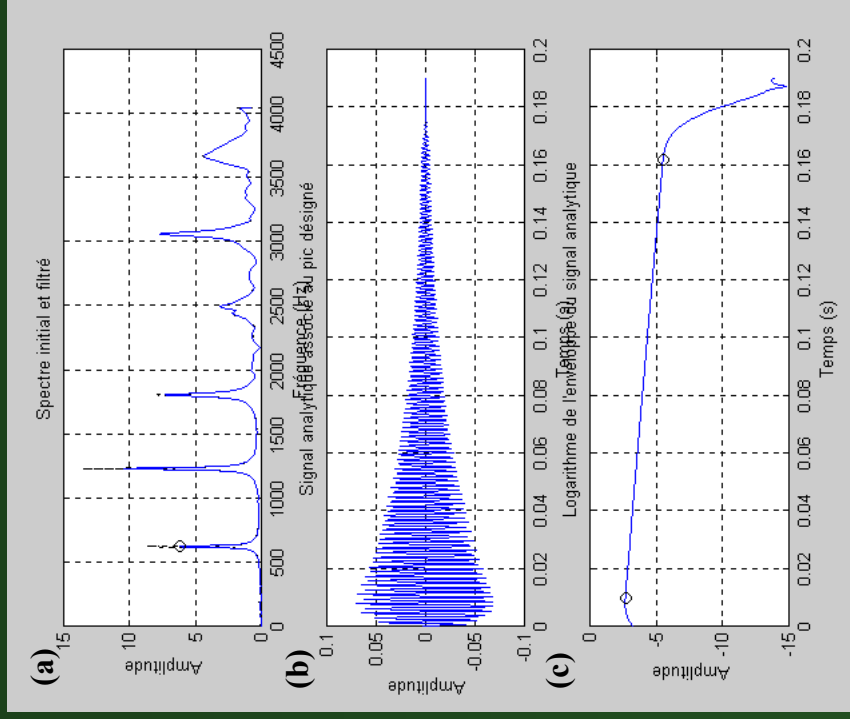
$$\overline{s(t)} = \sum_{p=1}^{\infty} A_p e^{-\alpha_p t} e^{i\omega_p t}$$



Connaissance de $\omega_1 \alpha_1, \omega_2 \alpha_2, \omega_3 \alpha_3$
 \Rightarrow Evaluation de $aE_{RX}, \beta, \tau_\sigma, \tau_\varepsilon$

Dynamique des poutres homogènes viscoélastiques

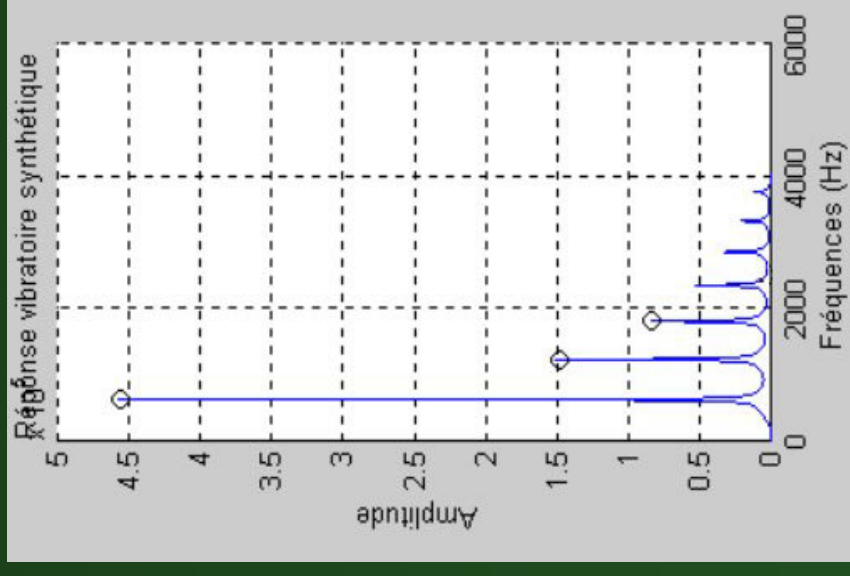
Exploitation des signaux



ω_i, α_i

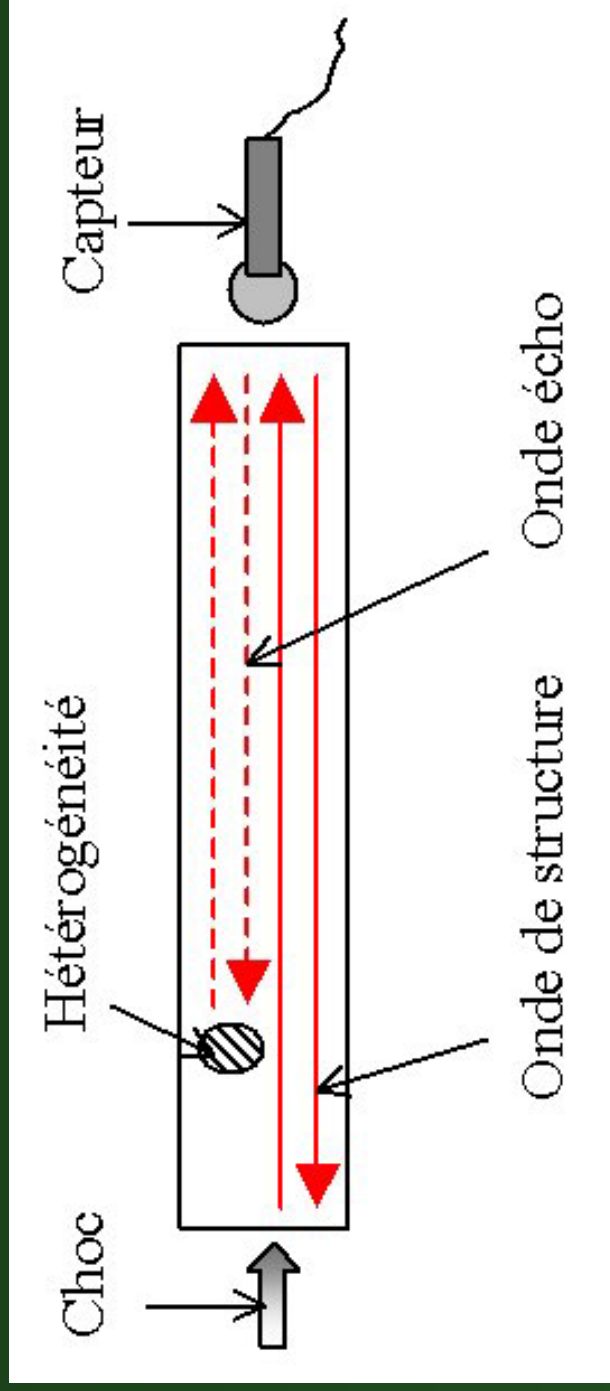


$a_{ERX}, \beta,$
 $\tau_\sigma, \tau_\varepsilon$



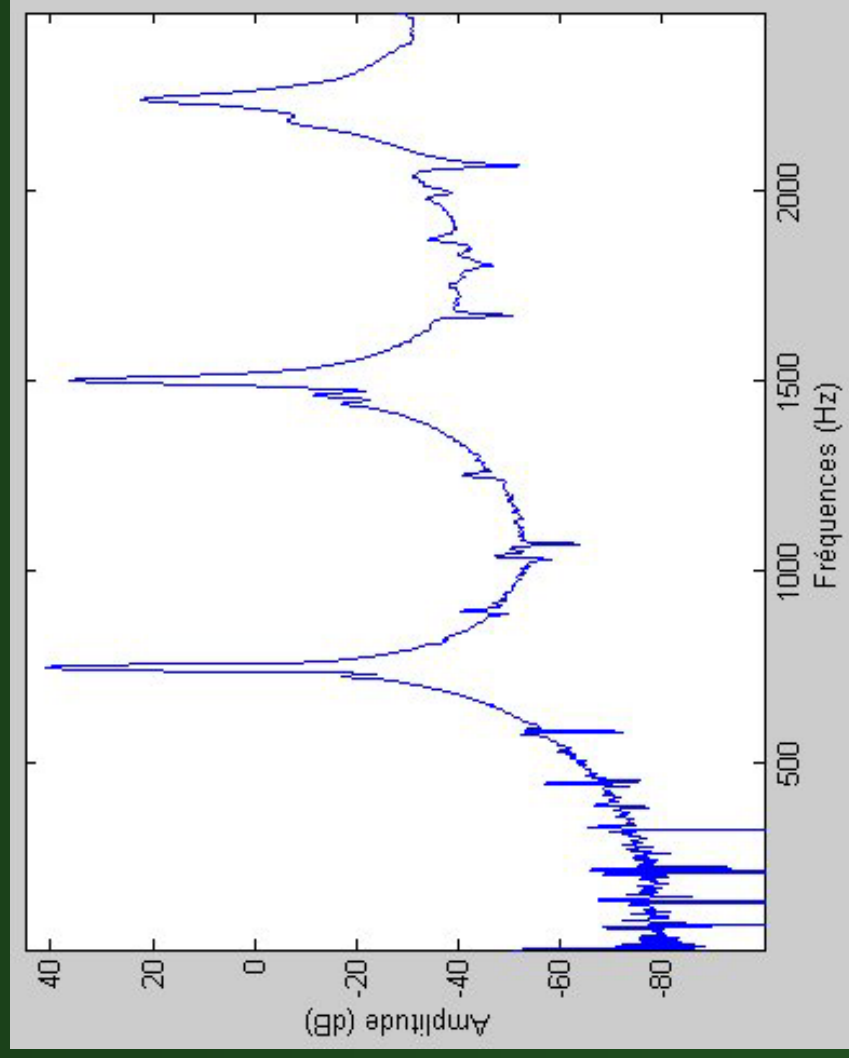
Détection des singularités prépondérantes dans les poutres

□ Principe physique de l'écholocalation



Détection des singularités prépondérantes dans les poutres

□ Principe théorique de l'écholocalion



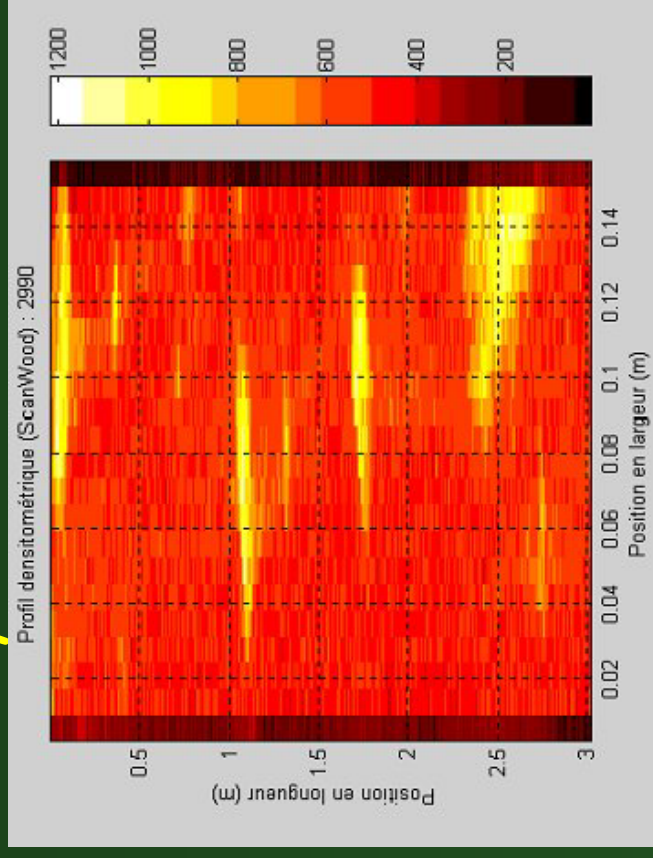
Détection des singularités prépondérantes dans les poutres

□ Observations expérimentales

- ✓ Matériel
3 poutres Pin S.



- ✓ Référence
Rayons X



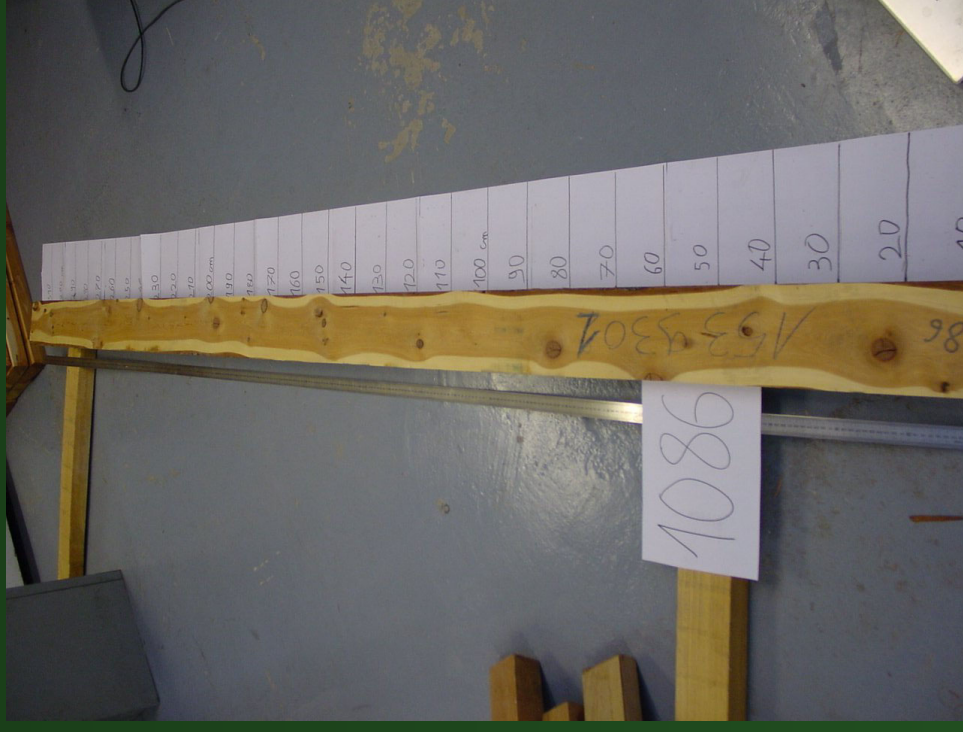
Détection des singularités prépondérantes dans les poutres

✓ Résultats de la validation expérimentale

N° Poutre	Analyse	P1 (m)	P2 (m)	P3 (m)	P4 (m)	P5 (m)
2990	Rayons X	1,7	1,9	2,5	3,0	*
	Echolocation	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1
3016	Rayons X	1,5	2,2	2,4	2,5	*
	Echolocation	1,7	2,0	2,1	2,2	*
3020	Rayons X	1,6	2,2	2,4	2,5	*
	Echolocation	1,5	1,6	1,9	2,1	*

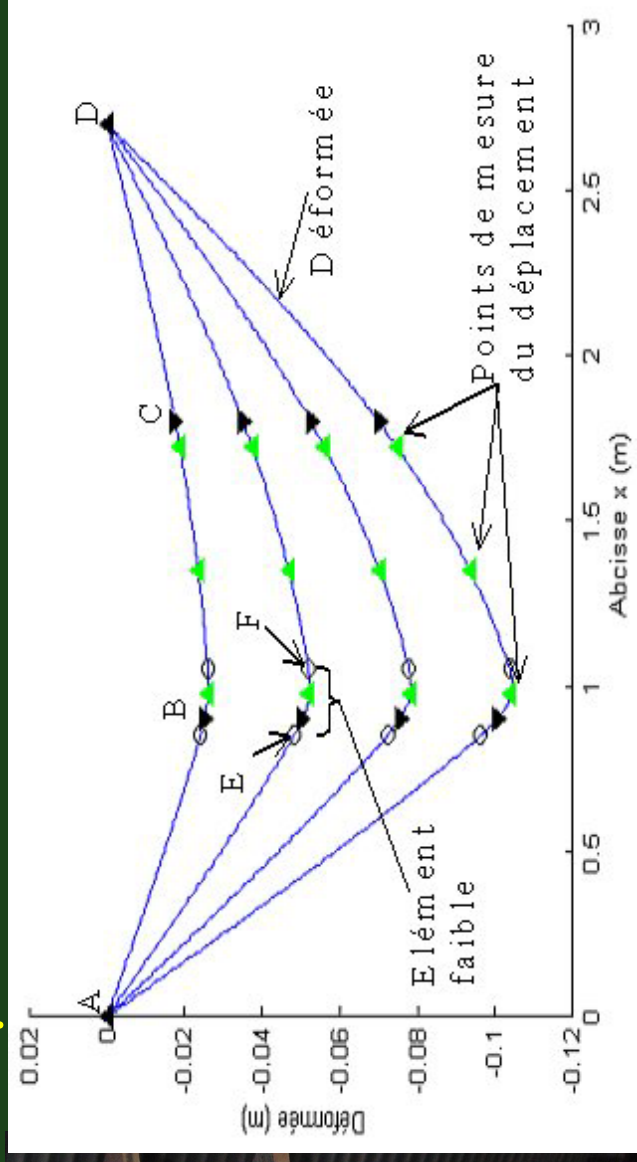
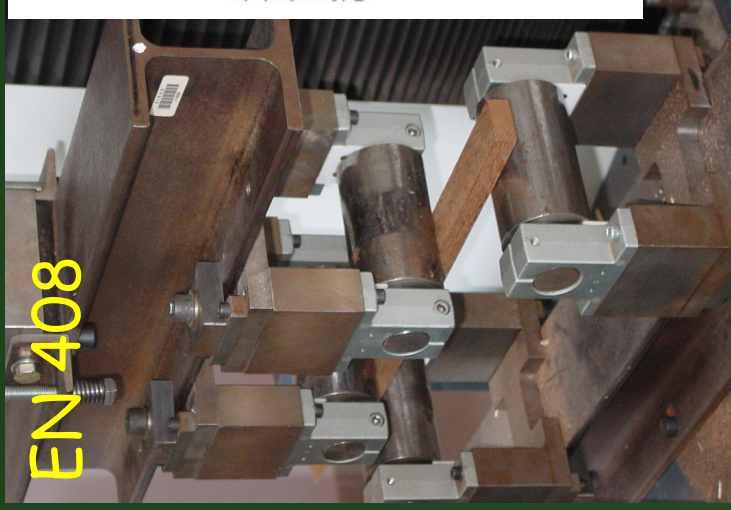
Mise en œuvre pratique

- Matériel végétal
 - ✓ 96 poutres (mélèze) en dimensions d'emploi
 - ✓ Sélection visuelle
- Démarche
 - ✓ Essais vibratoires
 - ✓ Essais normalisés
 - ✓ Analyses statistiques



Mise en œuvre pratique

- Prise en compte de l'essai normalisé
 - ✓ Utilisation des poutres à élément faible



Simulation de l'essai

Mise en œuvre pratique

□ Variables analytiques (n = 38)

Domaines de recherche :

- ✓ Dynamique classique
- ✓ Élément faible
- ✓ Simulation EN 408
- ✓ Modèle de synthèse

Nature des variables :

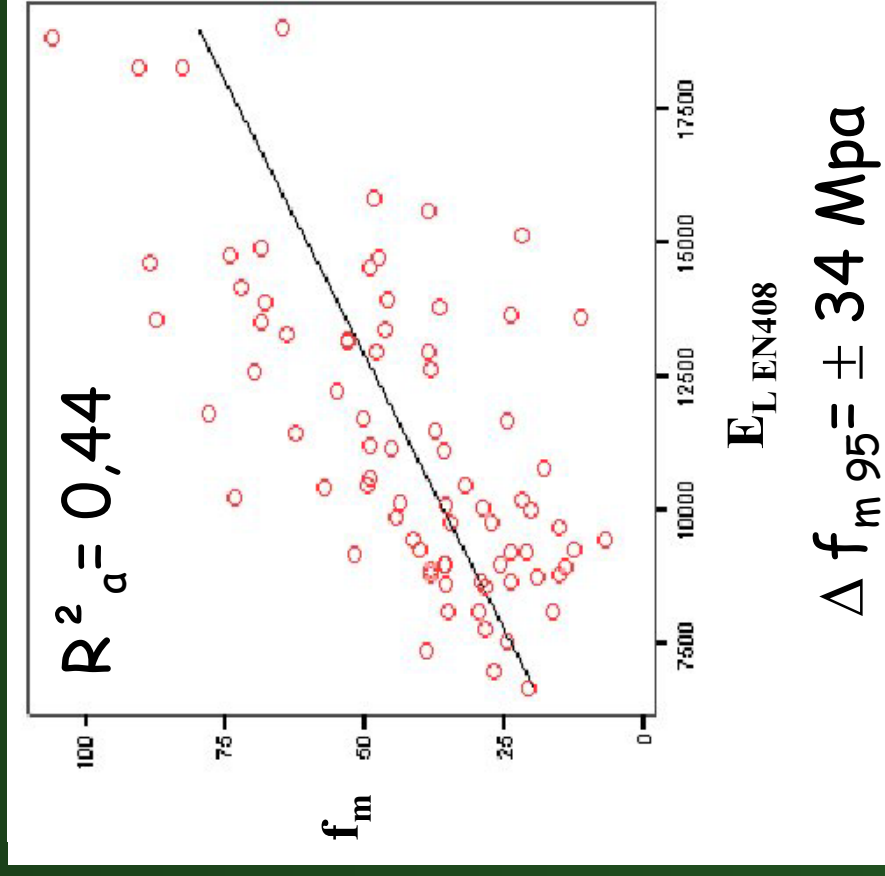


□ Contraintes des analyses statistiques

- ✓ Colinéarité des variables
- ✓ Validations croisées

Mise en œuvre pratique

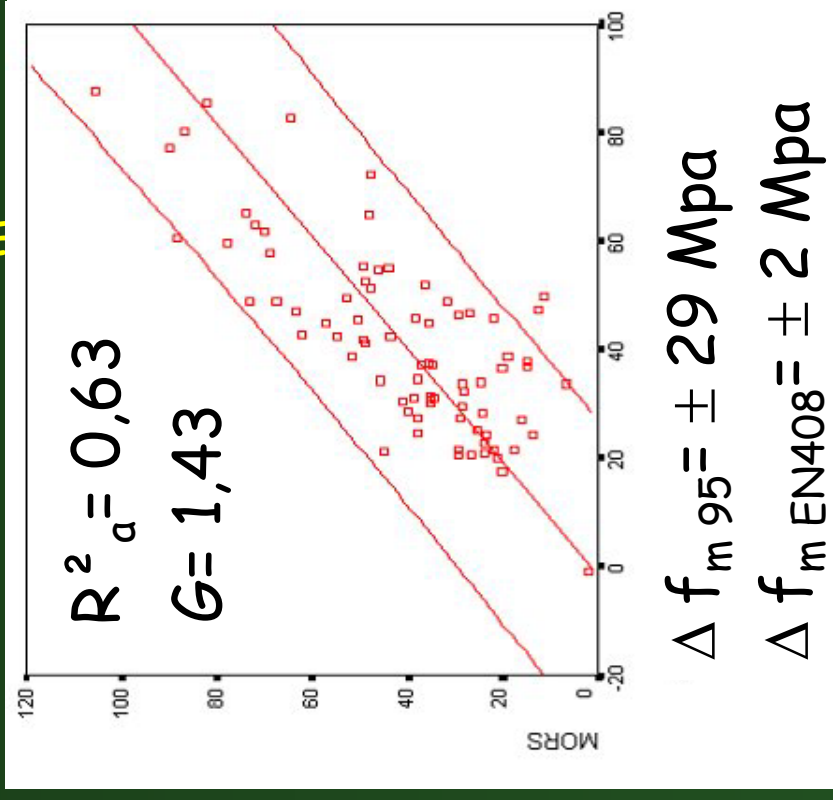
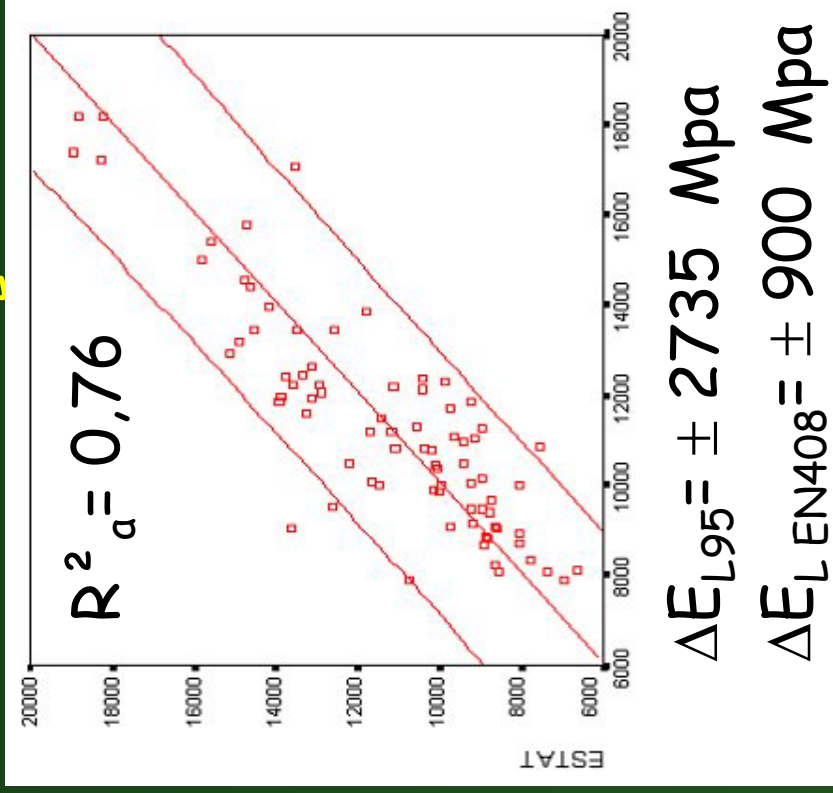
□ Régression linéaire simple



Mise en œuvre pratique

□ Régressions linéaires multiples (MLR)

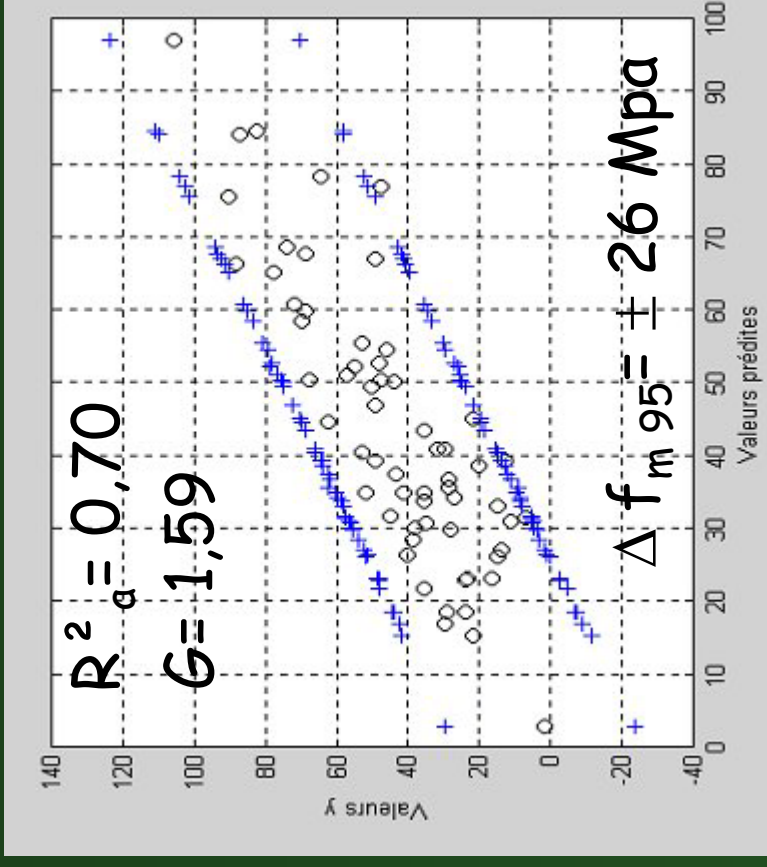
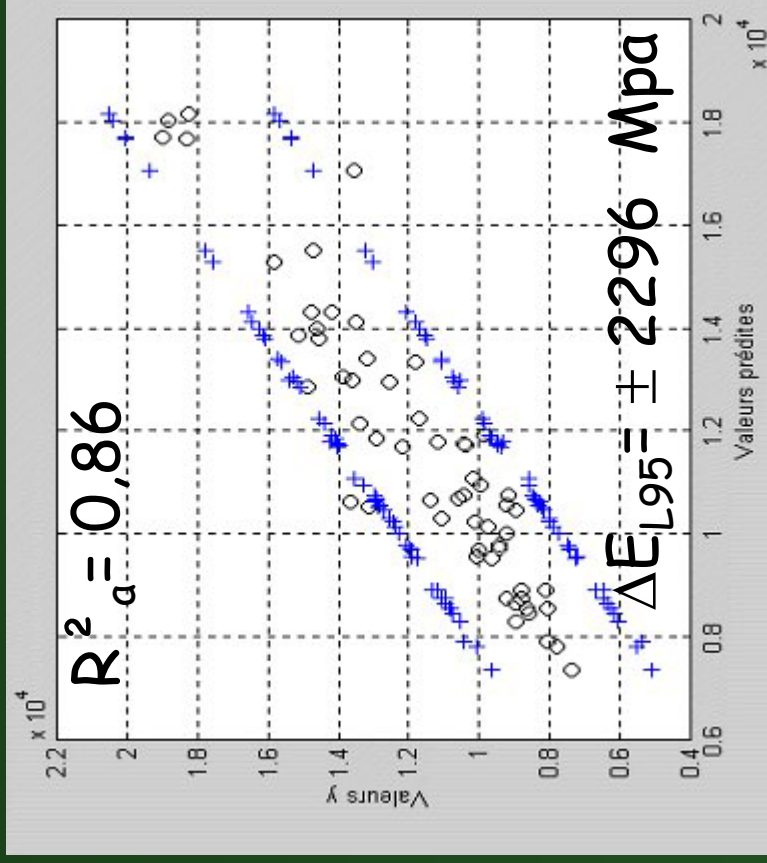
- ✓ Module E_L
- ✓ Contrainte f_m



Mise en œuvre pratique

□ Moindres carrés partiels (PLS)

- ✓ Module E_L
- ✓ Contrainte f_m

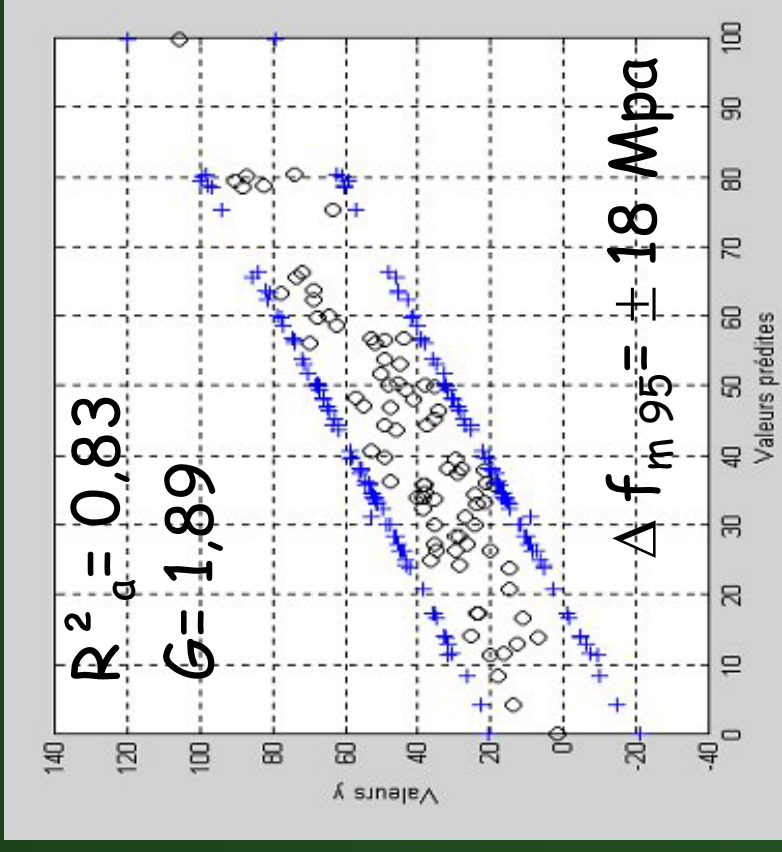
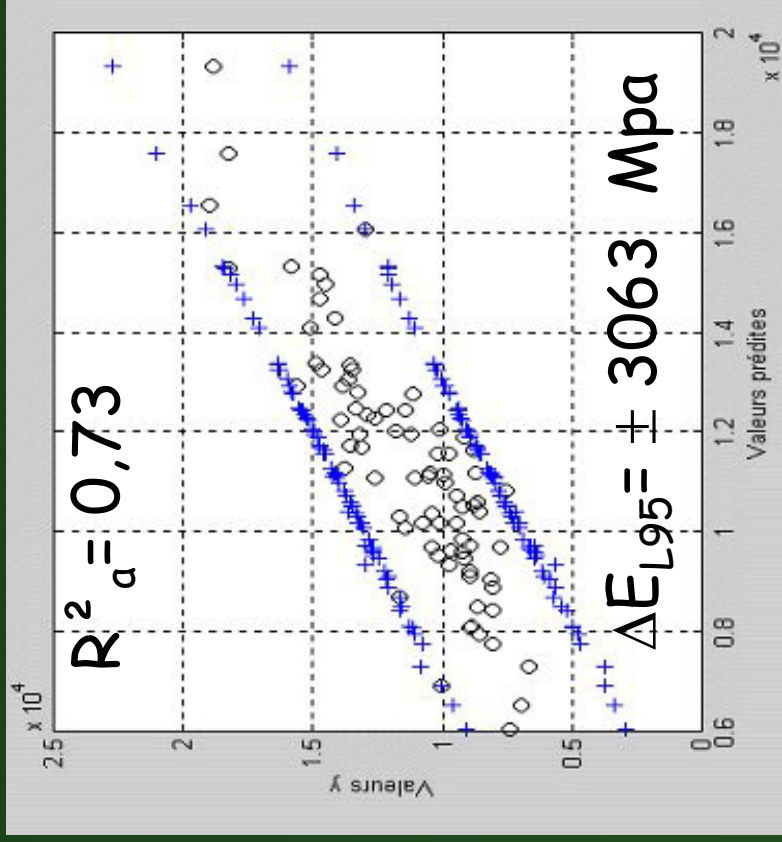


Mise en œuvre pratique

PLS sur spectres

✓ Module E_L

✓ Contrainte f_m



Conclusions

- Compréhension des phénomènes acoustiques
- Classement rigoureux des sciages

1) Méthode non destructive
Grandeurs physiques x_i

Vibrations acoustiques

- Elasticité
- Viscosité
- Hétérogénéité

Conclusions

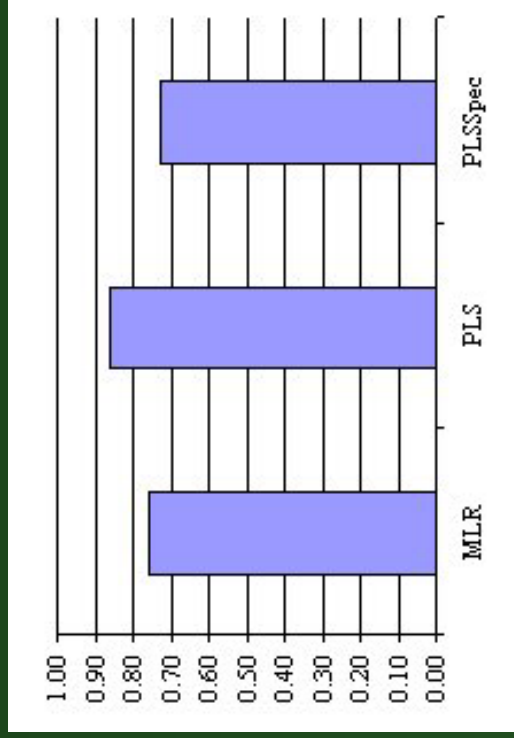
2) Relation statistique

$$F(x_j) = E_L, \quad G(x_j) = f_m$$

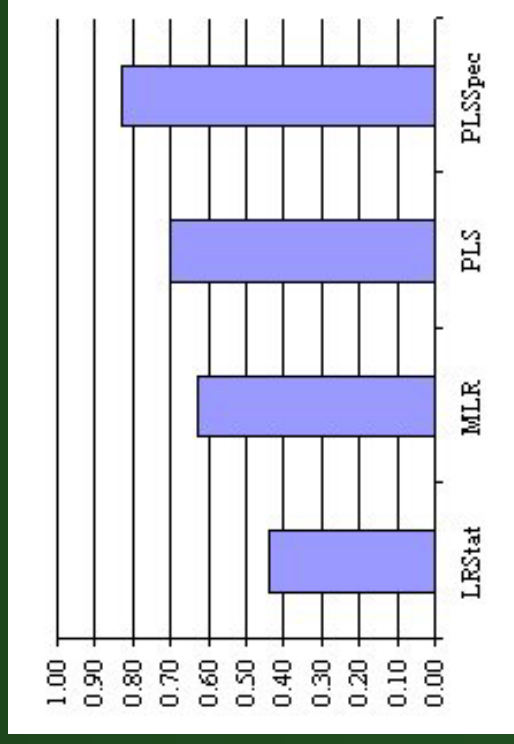
Modèles linéaires

- MLR
- PLS
- PLS Spectres

E_L



f_m



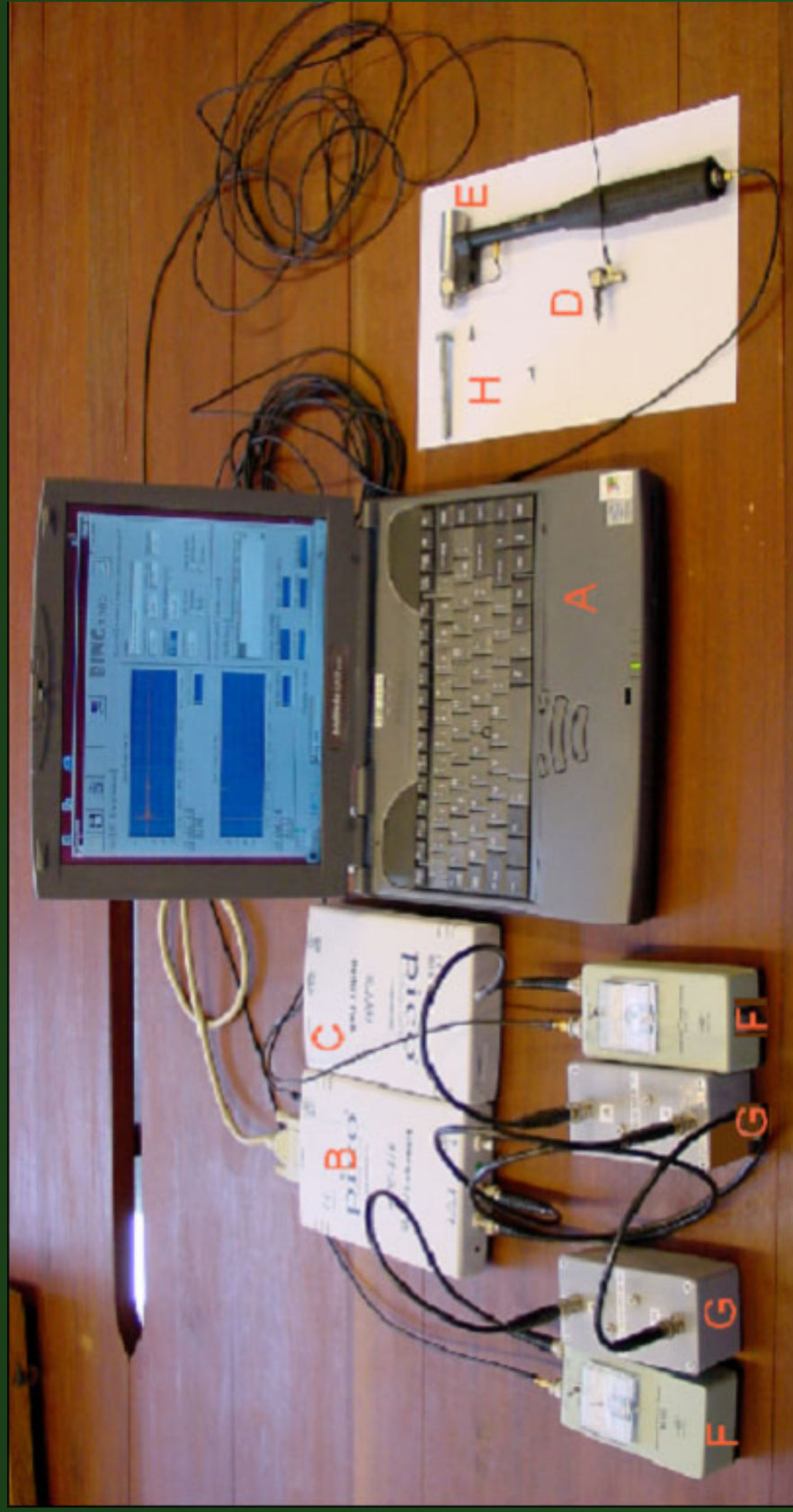
Perspectives

- Pour aller plus loin ...
 - ✓ Modèle de Timoshenko avec une poutre à élt. faible
 - ✓ Solution de Bordonné en synthèse sonore
 - ✓ Structure du bois pour la viscoélasticité
 - ✓ Moyens expérimentaux en écholocation
 - ✓ Intégration des différentes PLS
 - ✓ Problème de l'orientation de la méthode de référence

Merci !



Dispositif expérimental



Domaine acoustique, gamme [10Hz, 5000Hz]