

# **Evaluation ultrasonore des réparations de structures métalliques par collage de patches composites**

**Bénédicte LE CROM**

Sous la direction de **Michel CASTAINGS**

Correspondant scientifique DGA : **Gilles Raimondi**



## Contexte de l'étude

**Flotte aéronautique vieillissante**



**Apparition de dommages (fissures...)**



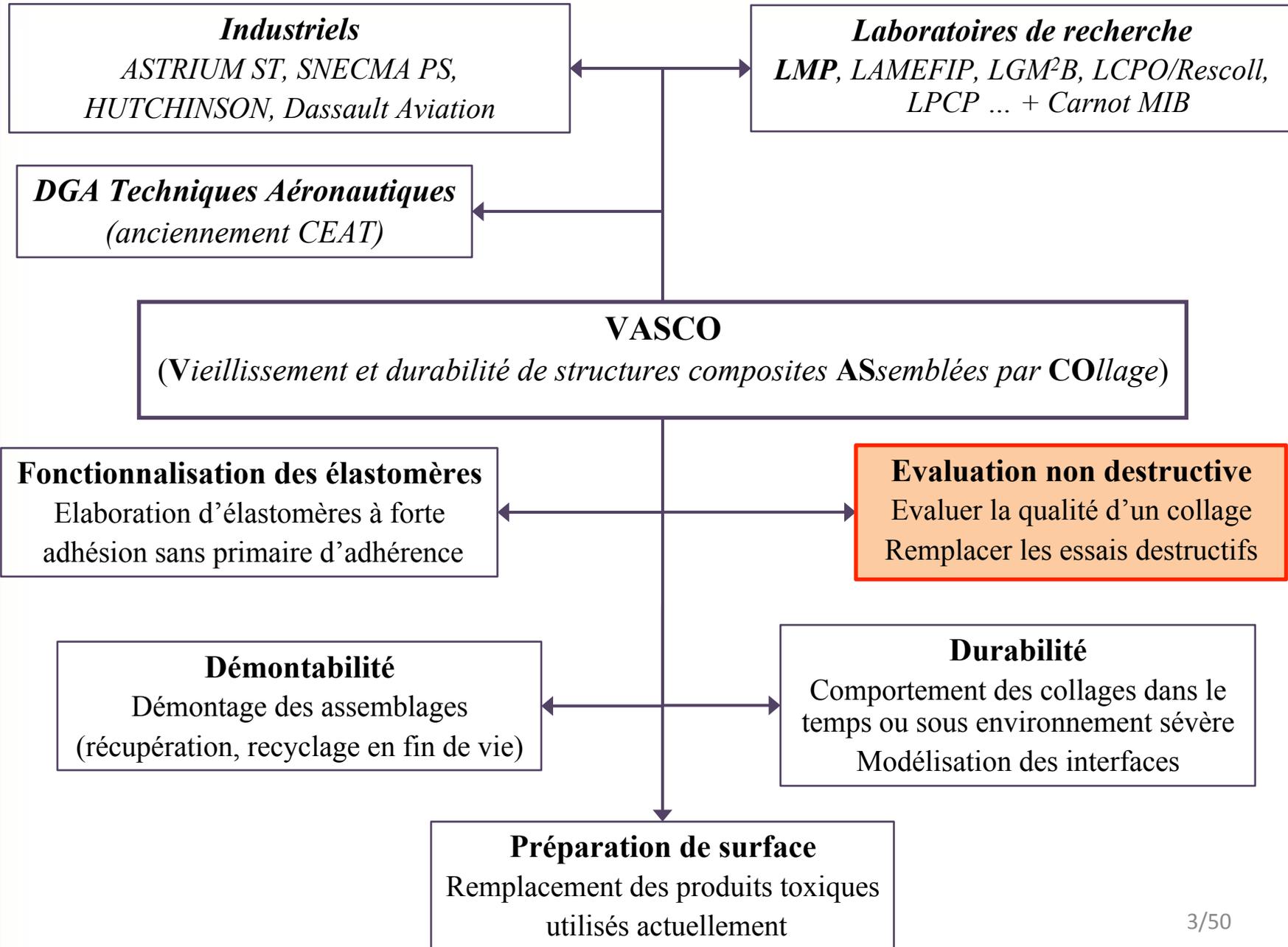
**Alternative aux réparations classiques**

**→ la réparation par collage de patch composite**



Garantir de manière **non destructive**  
la **qualité** du collage 2/50

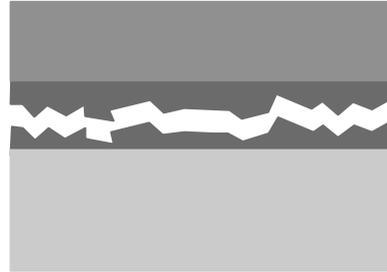
# Contexte de l'étude



## Type de défauts / dommages **cohésifs** ou **adhésifs**

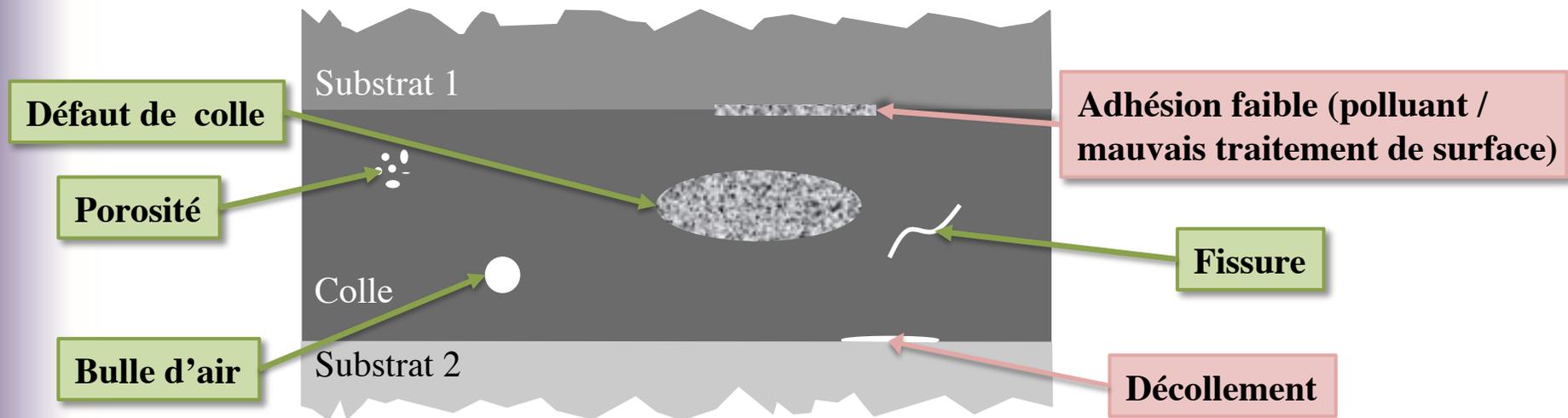
### Rupture **cohésive**

- ✓ Fissures
- ✓ Bulles d'air
- ✓ Porosité
- ✓ Faible tenue de la colle (mauvaise préparation)



### Rupture **adhésive**

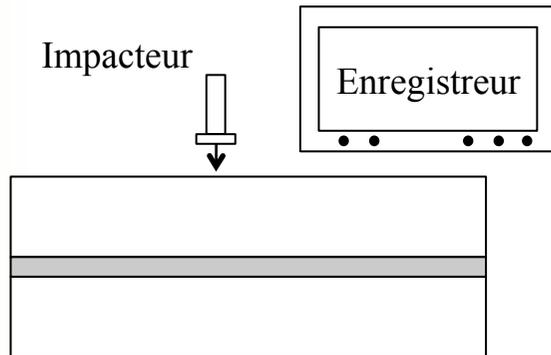
- ✓ Décollement
- ✓ Contaminant
- ✓ Mauvais traitement de surface



# Techniques de détection des défauts

## *Les vibrations soniques*

Evaluation de la raideur d'une structure par vibration/impact (un défaut modifie la raideur locale)



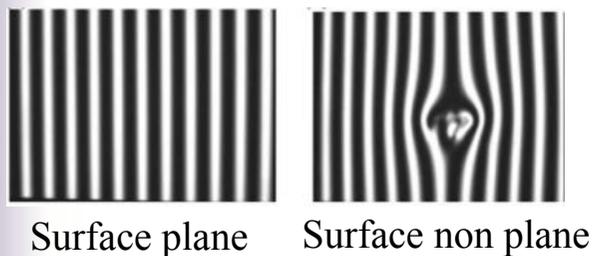
- ⊕ Détection de défaut cohésif et de décollement
- ⊖ Localisation difficile des défauts
- ⊖ Géométrie inconnue des défauts
- ⊖ Insensible à la qualité d'interface

*P. Cawley et al., Mater. Eval. 47, 1989*

---

## *Les techniques optiques*

Evaluation de la déformation de la surface d'une structure par la mesure des franges d'interférences



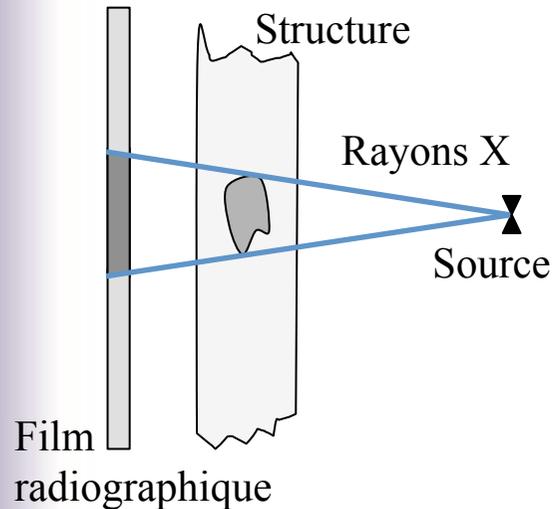
- ⊕ Détection de défaut cohésif et de décollement
- ⊕ Sans contact
- ⊖ Pas de localisation dans l'épaisseur
- ⊖ Valable pour des matériaux aux propriétés optiques adaptées

*F.W.Y. Chan et al., J. Nondestruct. Eval. 27, 2008*

# Techniques de détection des défauts

## La radiographie

Utilisation de rayons X et observation du rayonnement transmis

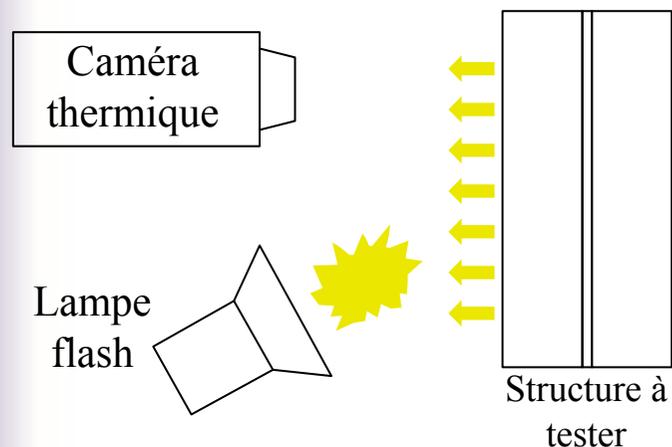


- + Détection de très petits défauts cohésifs et de décollements
- + Sans contact
- + Inspection globale de tout type de structure
- Méthode coûteuse (matériel, local sécurisé)
- Rayonnement dangereux pour la santé

*H.A. Jama et al., NDT&E Int. 31, 1998*

## Les techniques thermiques

Chauffage de la structure et mesure du champ de température



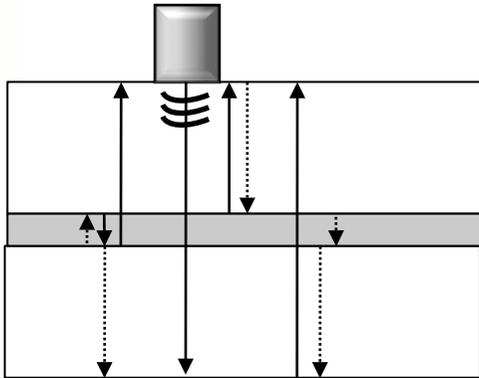
- + Détection de défaut cohésif et de décollement
- + Accès uni latéral et sans contact
- + Inspection globale et rapide de la structure
- Localisation difficile des défauts
- Identification difficile des défauts

*M. Genest et al., Compos. Struct. 88, 2009*

# Techniques de détection des défauts par ultrasons (contact / immersion)

## *En incidence normale*

Génération et détection d'une onde ultrasonore (longitudinale) perpendiculairement à la surface



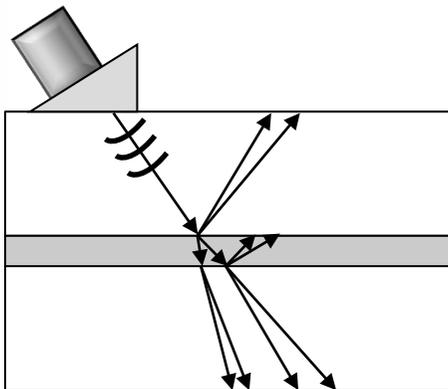
- ⊕ Détection de tout défaut de type cohésif
- ⊕ Evaluation de la géométrie du défaut
- ⊕ Accès uni latéral possible
- ⊖ Insensible aux défauts adhésifs
- ⊖ Difficultés pour analyser les signaux car nombreux échos
- ⊖ Nécessité d'un produit de couplage

*C.C.H. Guyott et al., NDT&E Int. 21, 1988*

*A. Baltazar et al., J. Acoust. Soc. Am. 114, 2003*

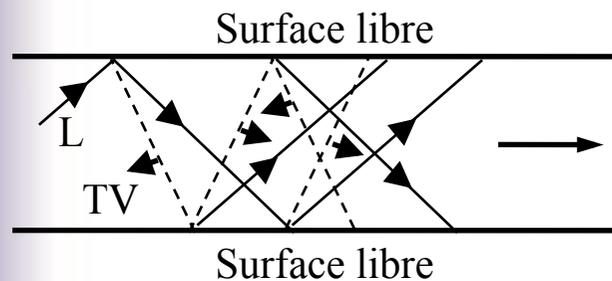
## *En incidence oblique*

Génération et détection d'une onde ultrasonore (transverse / longitudinale) avec un angle d'incidence



- ⊕ Détection de tout défaut de type cohésif
- ⊕ **Détection des « kissing bonds »**
- ⊕ Evaluation de la géométrie du défaut
- ⊕ Accès uni latéral possible
- ⊖ Difficultés pour analyser les signaux car nombreux échos
- ⊖ Nécessité d'un produit de couplage

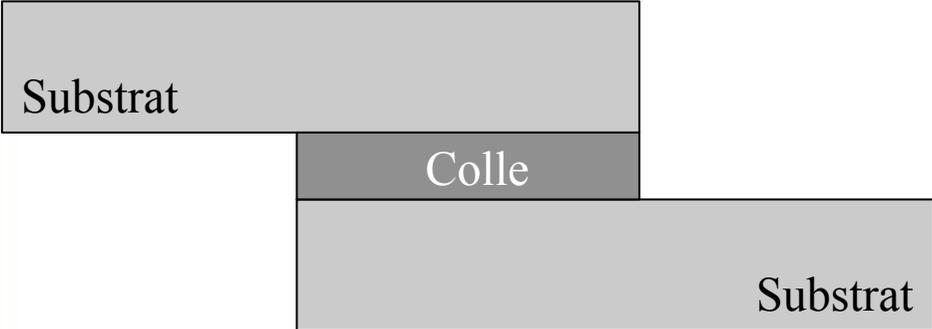
# Evaluation non destructive d'un collage par ondes guidées



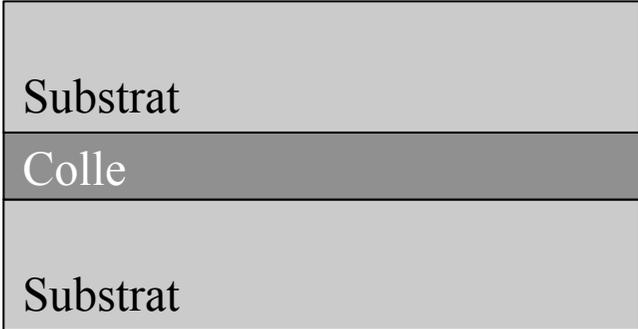
- ⊕ Propagation sur de grandes distances
- ⊕ Détection des défauts cohésifs
- ⊕ Sollicitation mécanique de la structure dans son épaisseur
  - ➔ accumulation d'informations sur le milieu
  - ➔ évaluation des propriétés mécaniques
- ⊕ Accès uni latéral / sans contact possible

	Matériaux	Géométrie	Principal résultat
<b>Santos et al.,</b> <i>J. Adhes 84, 2008</i>	Alu./Colle/Alu.	Lap joint	Détection de trous
<b>Duffo et al.,</b> <i>Compos. Struct. 79, 2007</i>	Compos./Colle/Compos.	Tricouche	Idem + dimensionnement
<b>Heller et al.,</b> <i>NDT&amp;E Int. 33, 2000</i>	Alu./Colle/Alu.	Tricouche	Sensibilité au vieillissement chimique
<b>Lowe et al.,</b> <i>J. Acoust. Soc. Am. 107, 2000</i>	Alu./Colle/Alu.	Lap joint	Dimensionnement de la zone de recouvrement
<b>Castaigns et al.,</b> <i>Ultrasonics 42, 2004</i>	Compos./Colle/Béton	Tricouche	Corrélation essai US / traction uni axiale
<b>Lanz di Scalea et al.,</b> <i>J. Acoust. Soc. Am. 115, 2004</i>	Alu./Colle/Alu.	Lap joint	Variation du coeff. de transm. en fonction de 3 niv. de cohésion
<b>Koreck et al.,</b> <i>J. Nondestruct. Eval. 26, 2007</i>	Alu./Colle	Bicouche	Résolution d'un pb. inverse

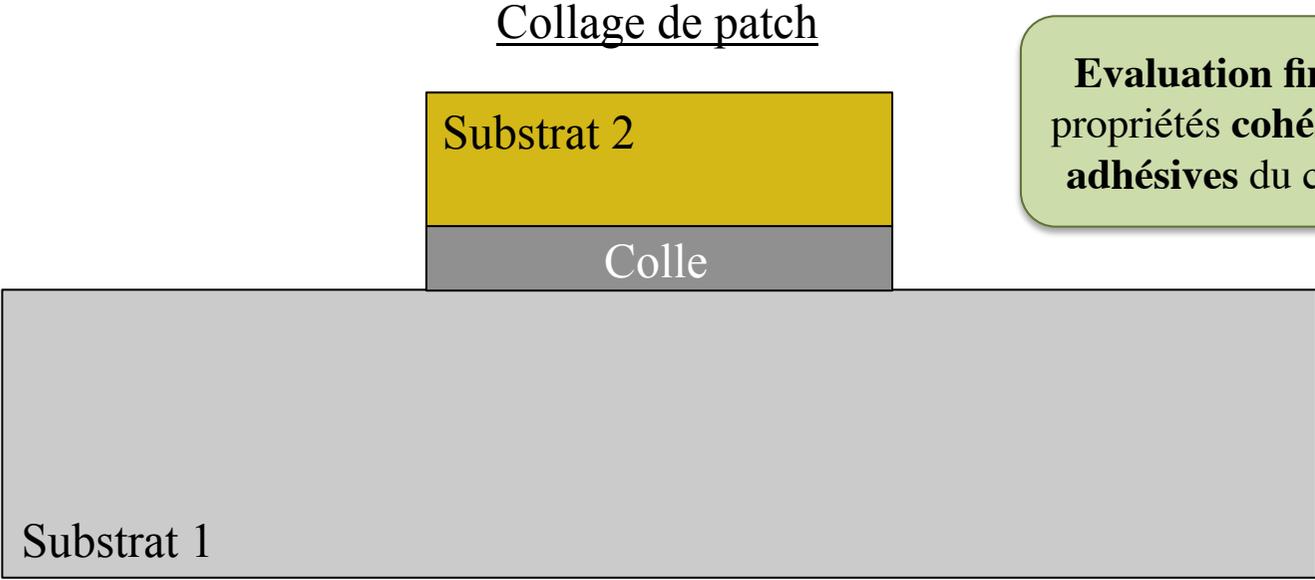
# Evaluation non destructive d'un collage de patch par ondes guidées



Lap joint

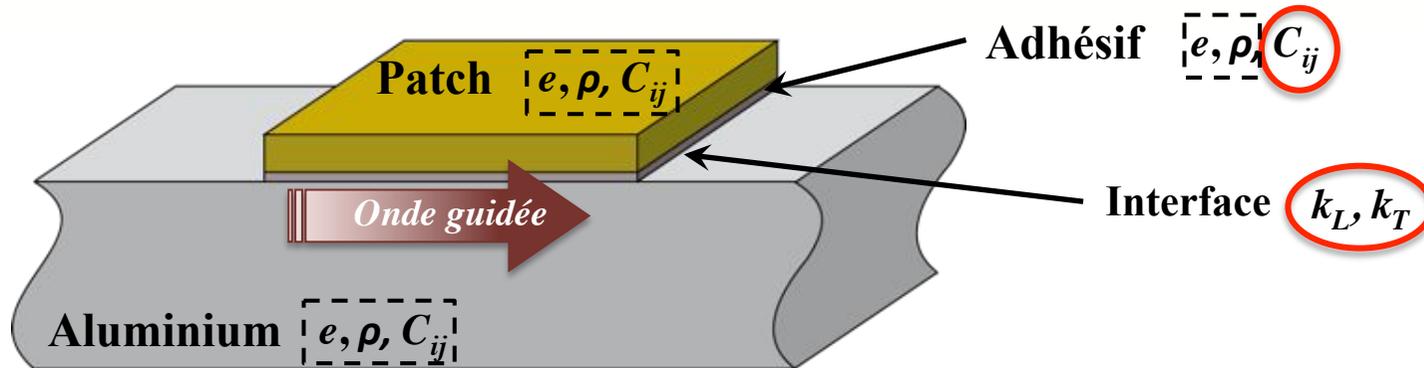


Tricouche



**Evaluation fine** des propriétés **cohésives** et **adhésives** du collage

# Evaluation non destructive d'un collage de patch par ondes guidées



Objectif → Evaluer la qualité du collage

- Cisaillement ( $G=C_{66}=C_{44}$ )
- Compression/traction ( $C_{11}$ )
- Raideurs de l'interface aluminium/colle ( $k_L, k_T$ )

Quelle(s) onde(s) ? → Etude de sensibilité

1. Etudier l'influence de tous les paramètres ( $e, \rho, C_{ij}, k_{L,T}$ )
2. Sélectionner une onde plus sensible aux propriétés de la colle et/ou de l'interface qu'aux autres paramètres

Mesures expérimentales / Simulations numériques

Problème inverse

# Plan de la présentation

## I. Contexte de l'étude

## II. Les ondes SH pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Dispositif expérimental / Mesures*
- ✓ *Problème inverse*

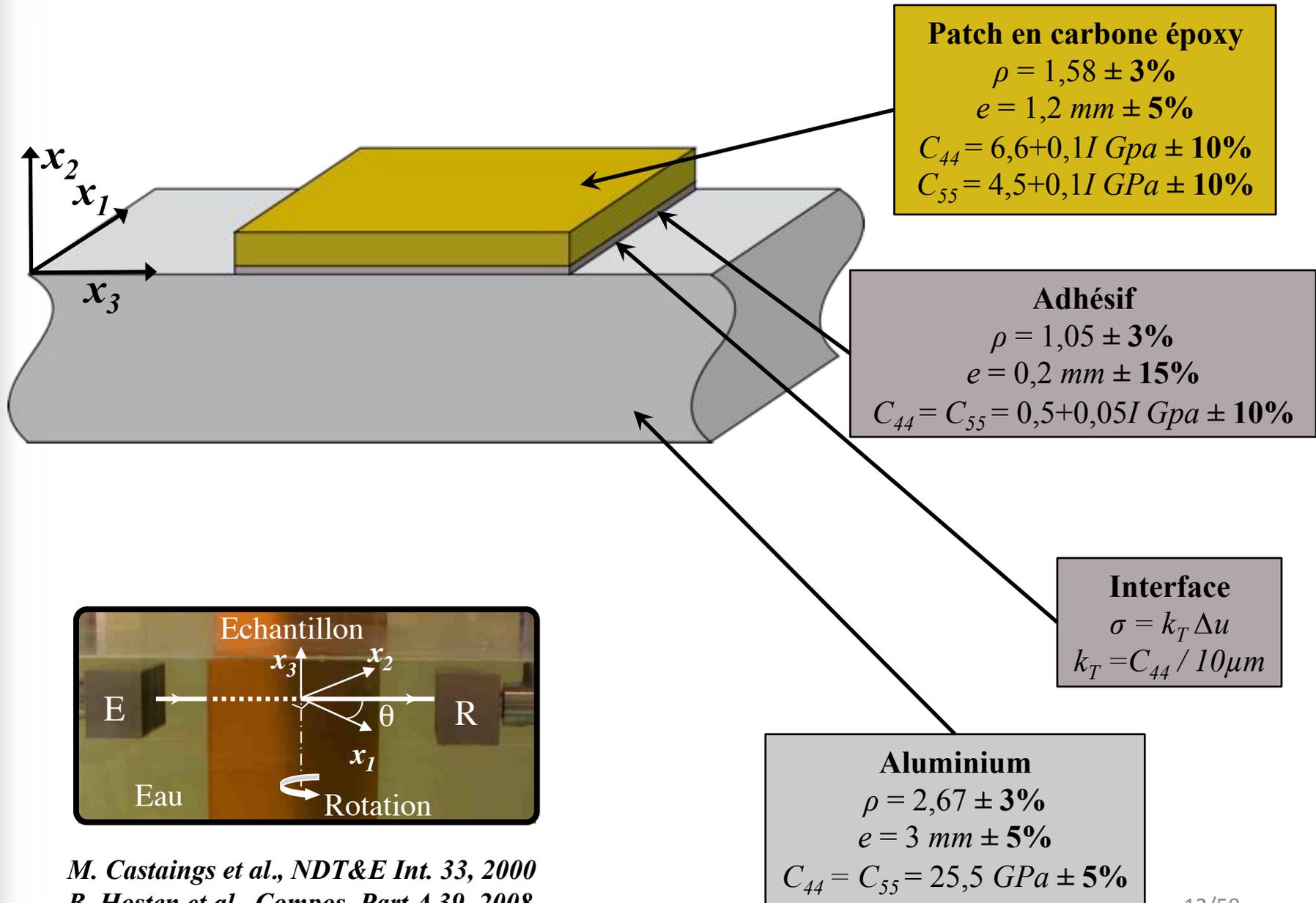
## III. Les ondes de Lamb pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Transmission d'une onde par une zone collée : simulations, mesures*
- ✓ *Vers la résolution d'un problème inverse*

## IV. Essais non destructifs / Essais mécaniques

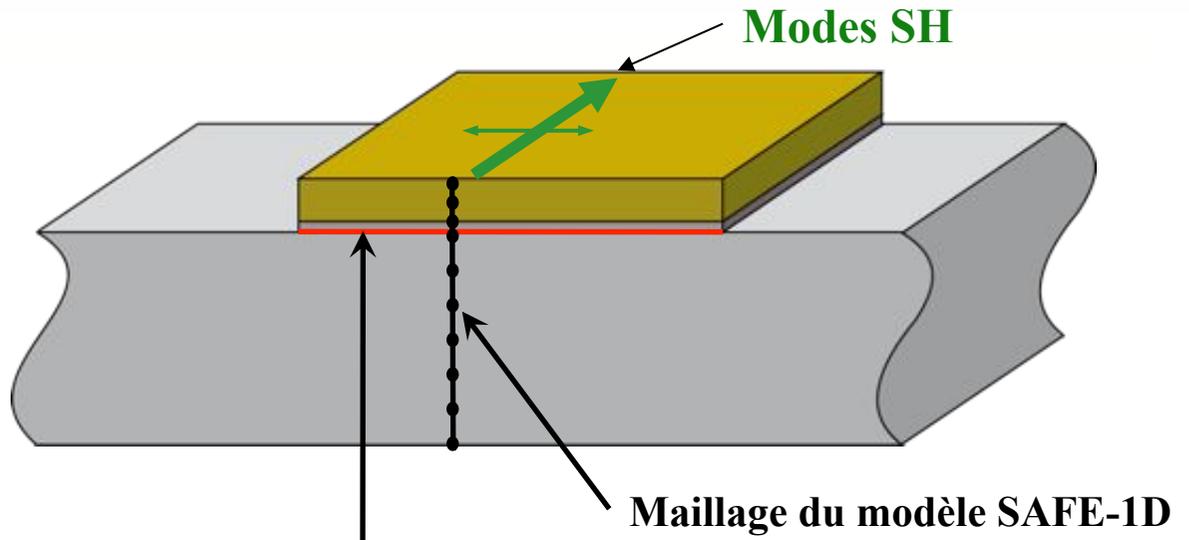
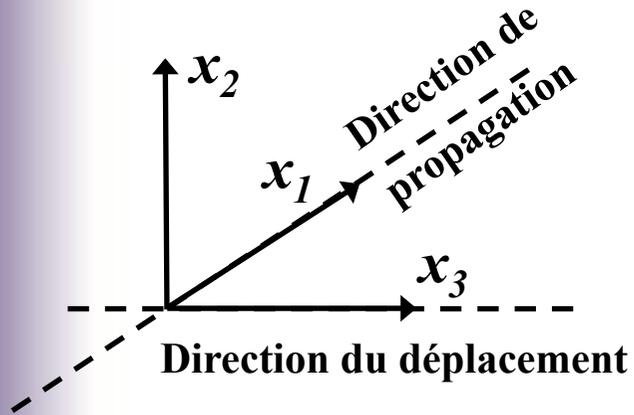
## V. Conclusions et perspectives

# La géométrie et les propriétés matériaux



M. Castaings et al., *NDT&E Int.* 33, 2000  
 B. Hosten et al., *Compos. Part A* 39, 2008

# Le calcul des courbes de dispersion des modes guidés SH



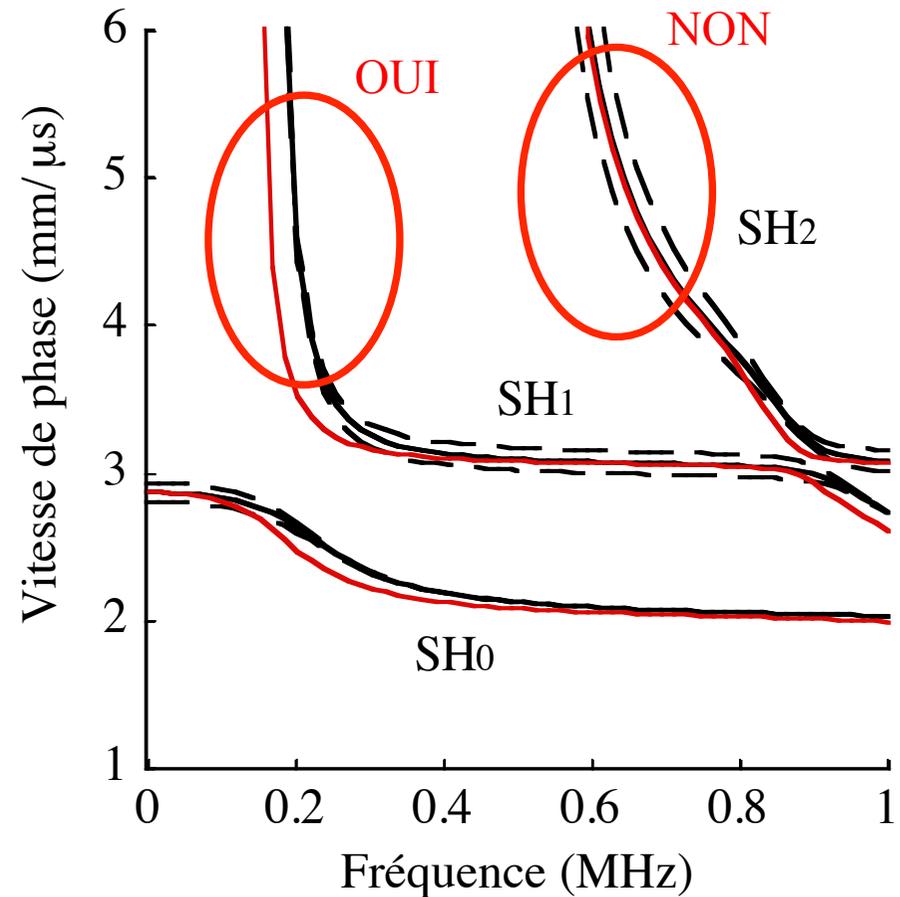
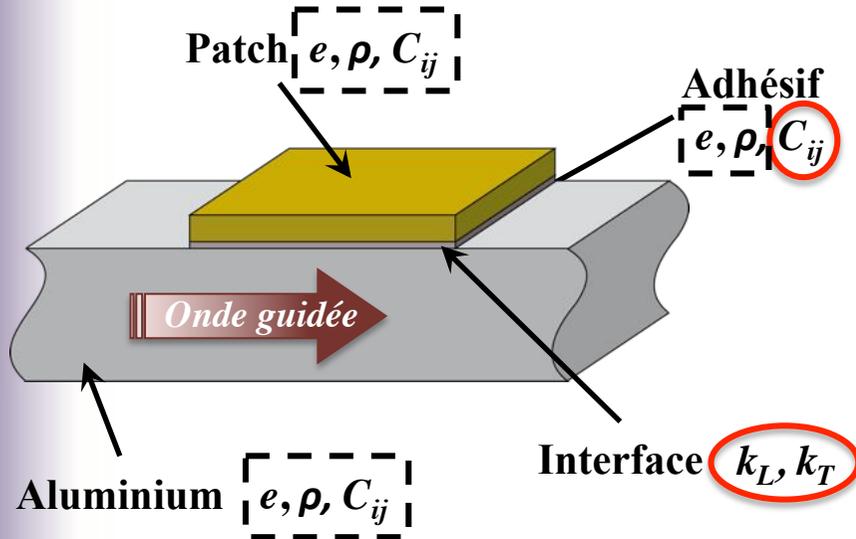
Modèle de Jones :  $\sigma = k_T \Delta u$

On considère un déplacement de la forme : 
$$U(x_1, x_2, x_3, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_3(x_2)e^{I(\omega t - kx_1)} \end{pmatrix}, \quad I^2 = -1$$

Le problème aux valeurs propres dans le domaine s'écrit : 
$$C_{44} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} - k^2 C_{55} u_3 + \rho \omega^2 u_3 = 0$$

et la condition aux frontières du domaine s'écrit : 
$$T_3 = \sigma_{23} n_2 = C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} n_2$$

# Etude de sensibilité – Principe de la démarche

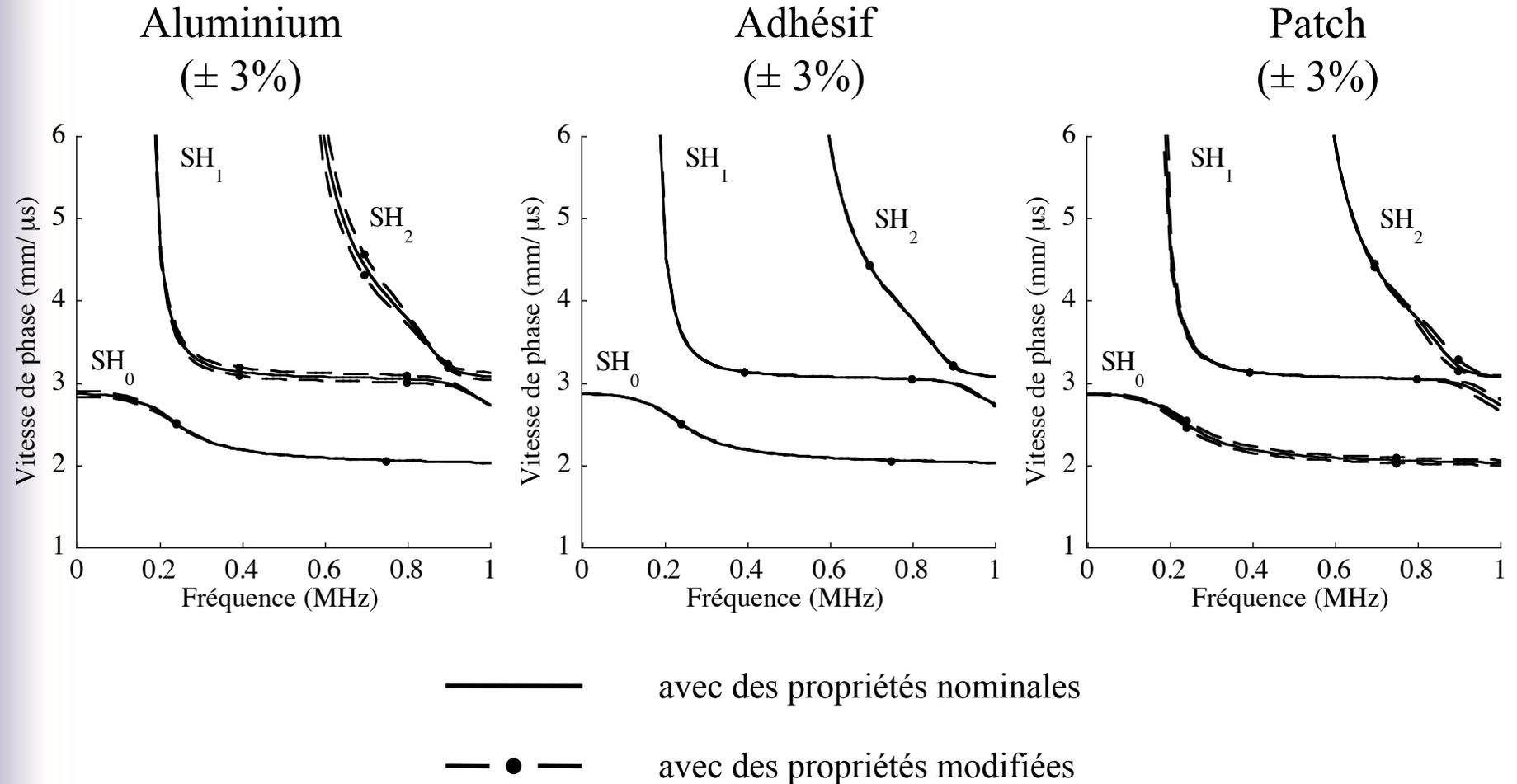


— avec des propriétés nominales

- - - avec la densité, l'épaisseur de l'un des matériaux ou les modules de viscoélasticité des substrats modifiés (au sein de leur intervalle de confiance)

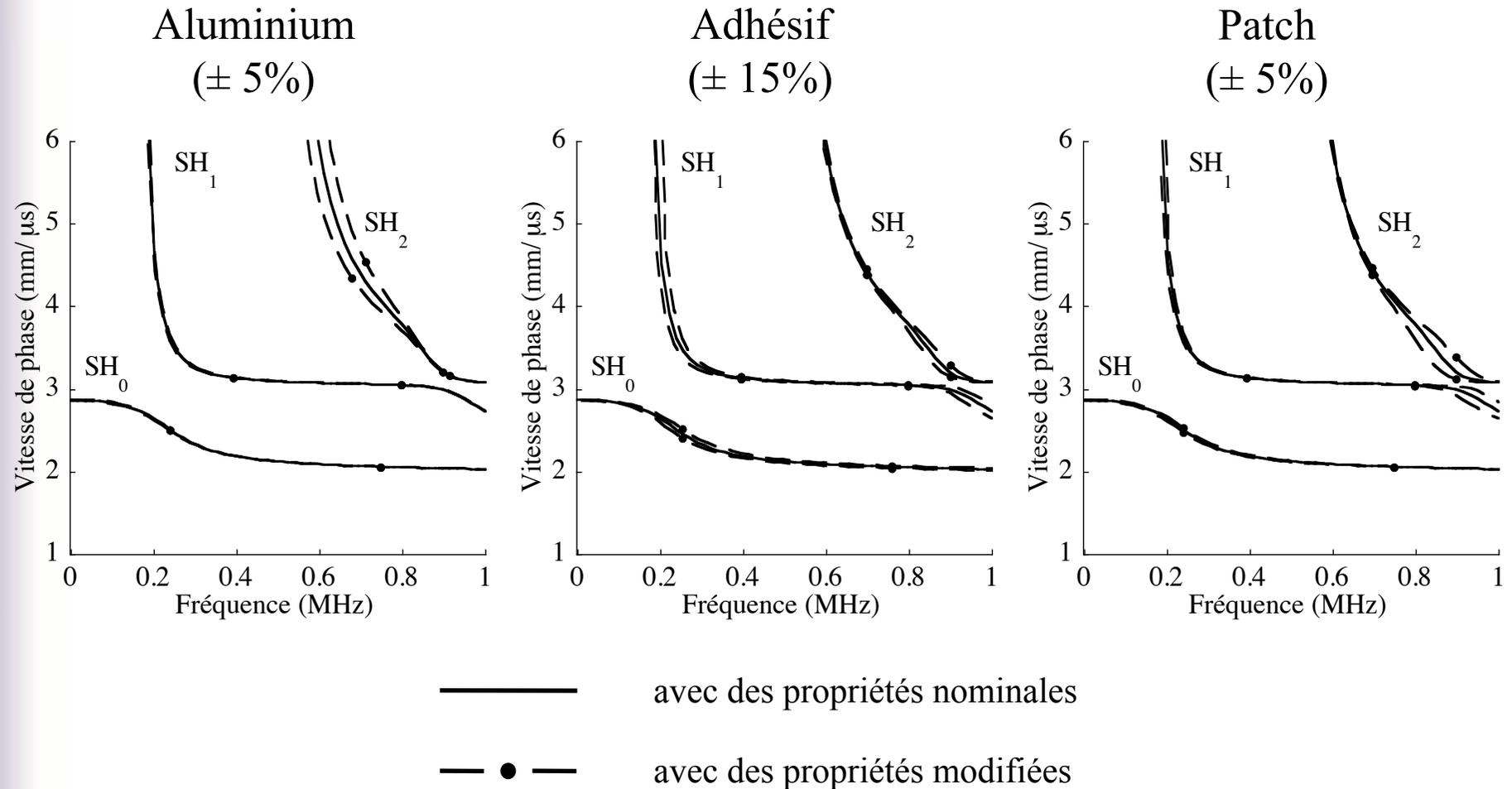
— avec des propriétés modifiées de l'adhésif ou de l'interface

# Sensibilité des ondes SH aux densités



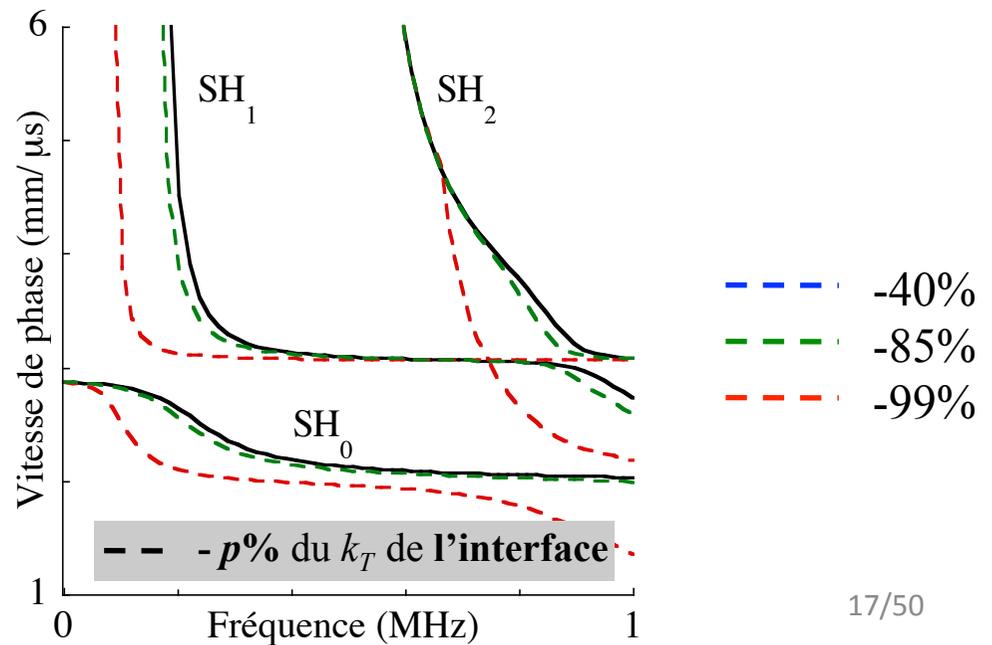
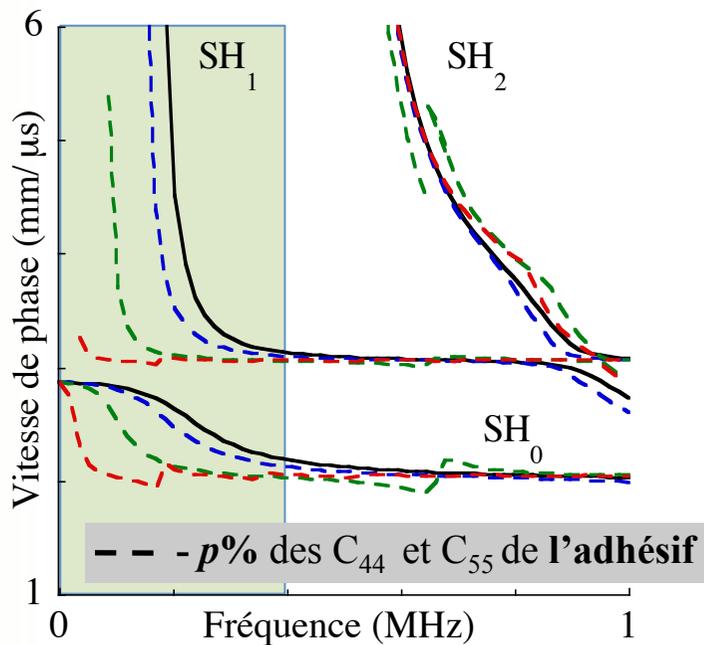
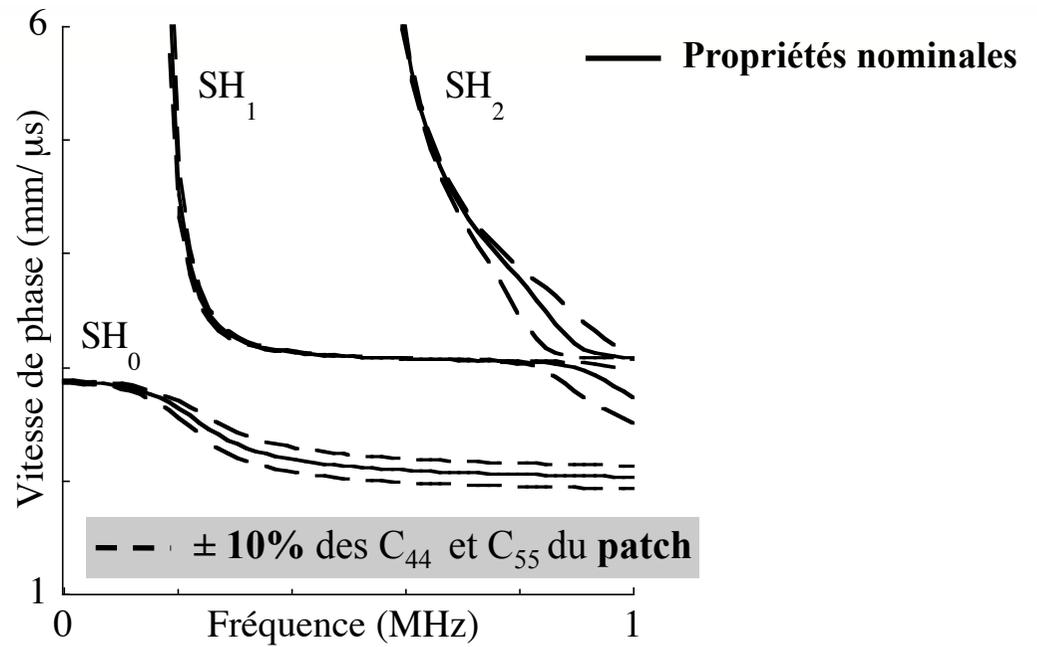
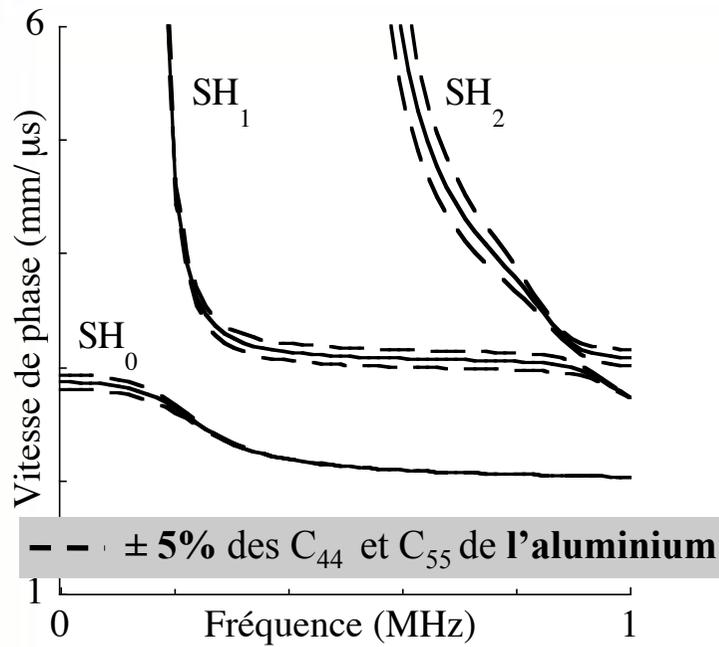
Le mode SH<sub>2</sub> est relativement sensible aux densités de l'aluminium ou du patch  
Même conclusion pour le mode SH<sub>1</sub> au dessus de  $F_{SH1}^c$   
Les 3 modes sont très peu sensibles à la densité de l'adhésif

# Sensibilité des ondes SH aux épaisseurs

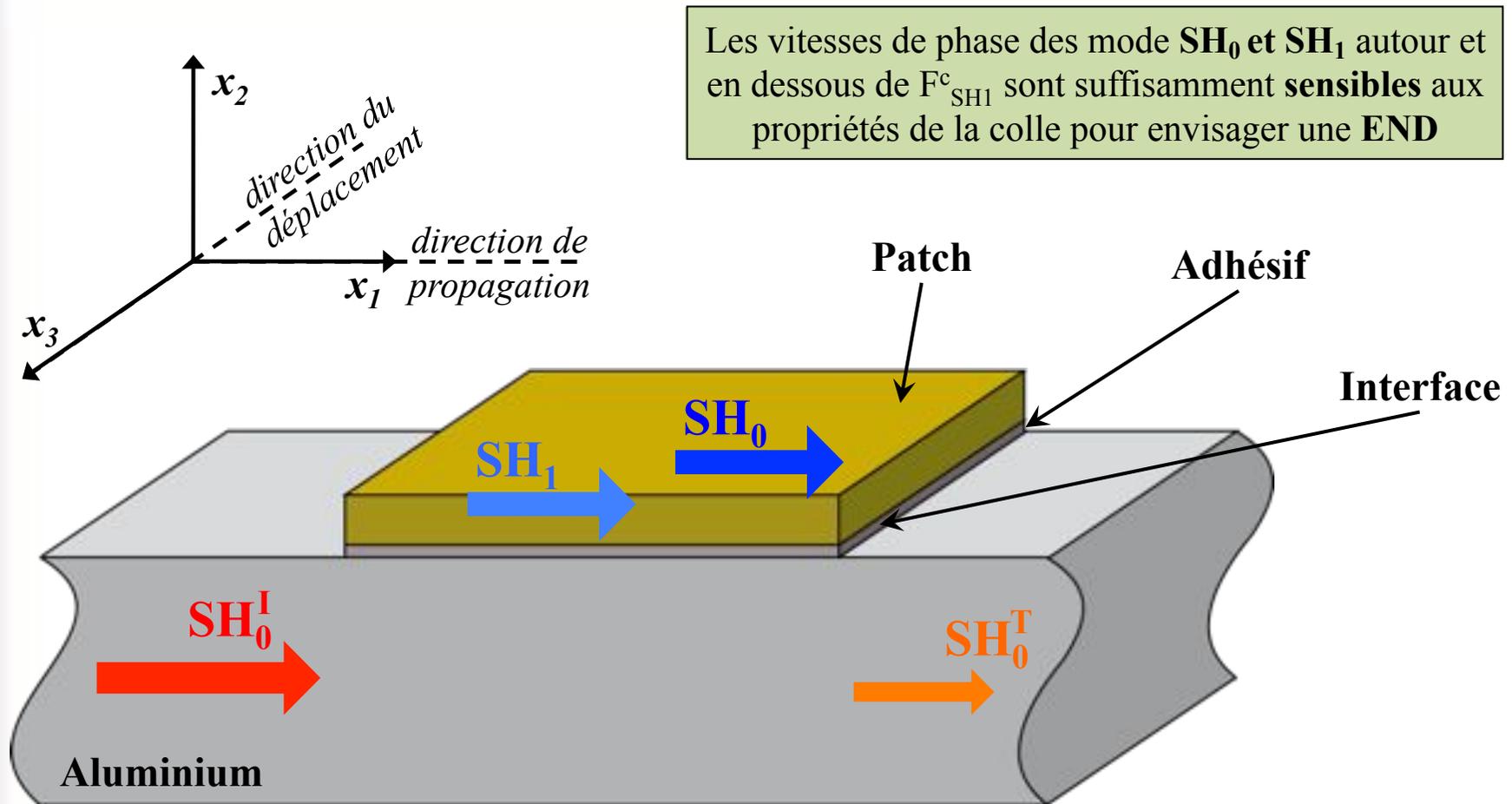


Le mode SH<sub>2</sub> est trop sensible aux épaisseurs des 3 matériaux  
Le mode SH<sub>1</sub> est sensible à l'épaisseur de l'adhésif autour de F<sup>c</sup><sub>SH1</sub>

# Sensibilité des ondes SH aux propriétés en cisaillement



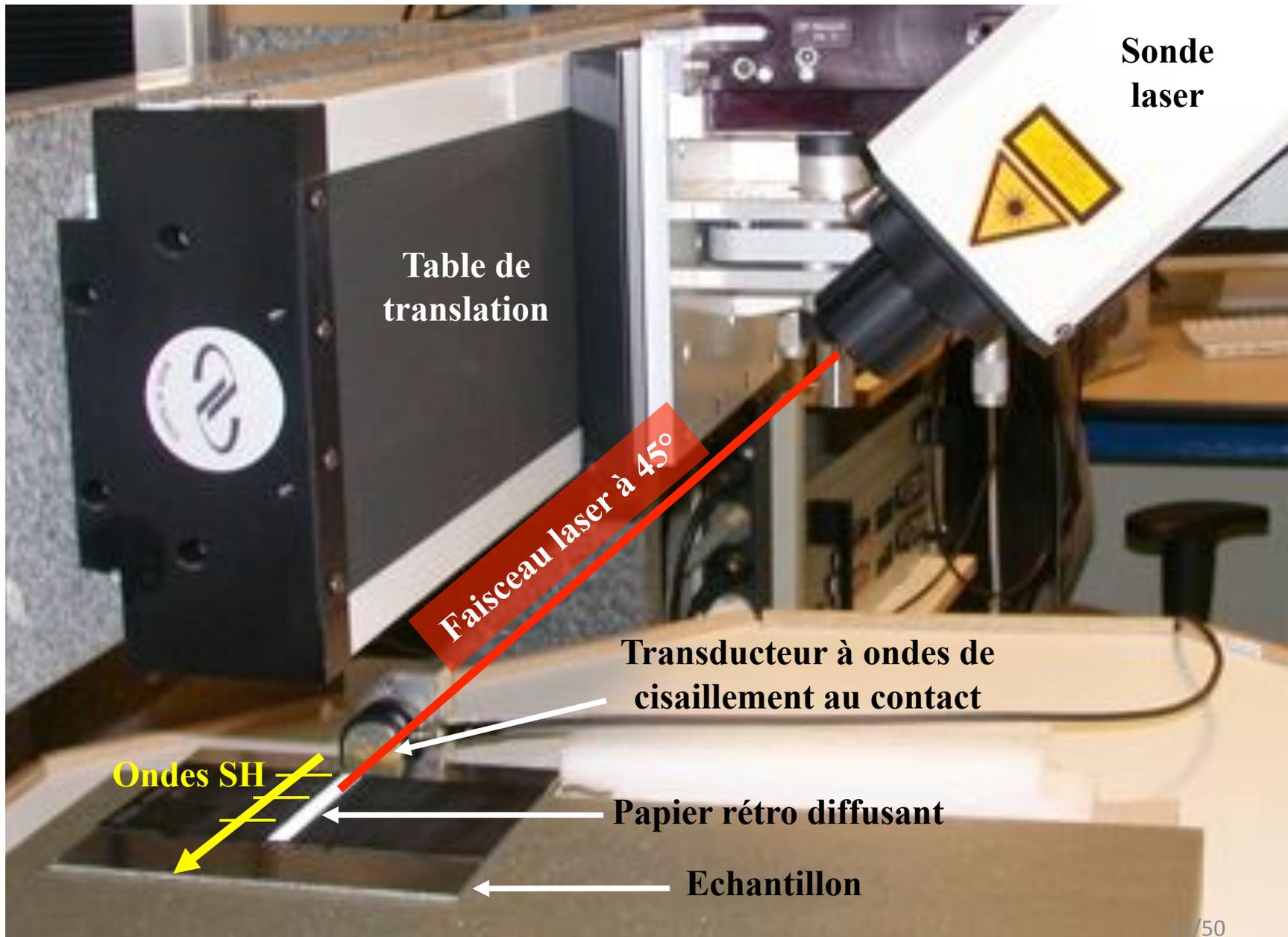
# Exploitation de l'étude de sensibilité pour l'évaluation du $G$ de la colle



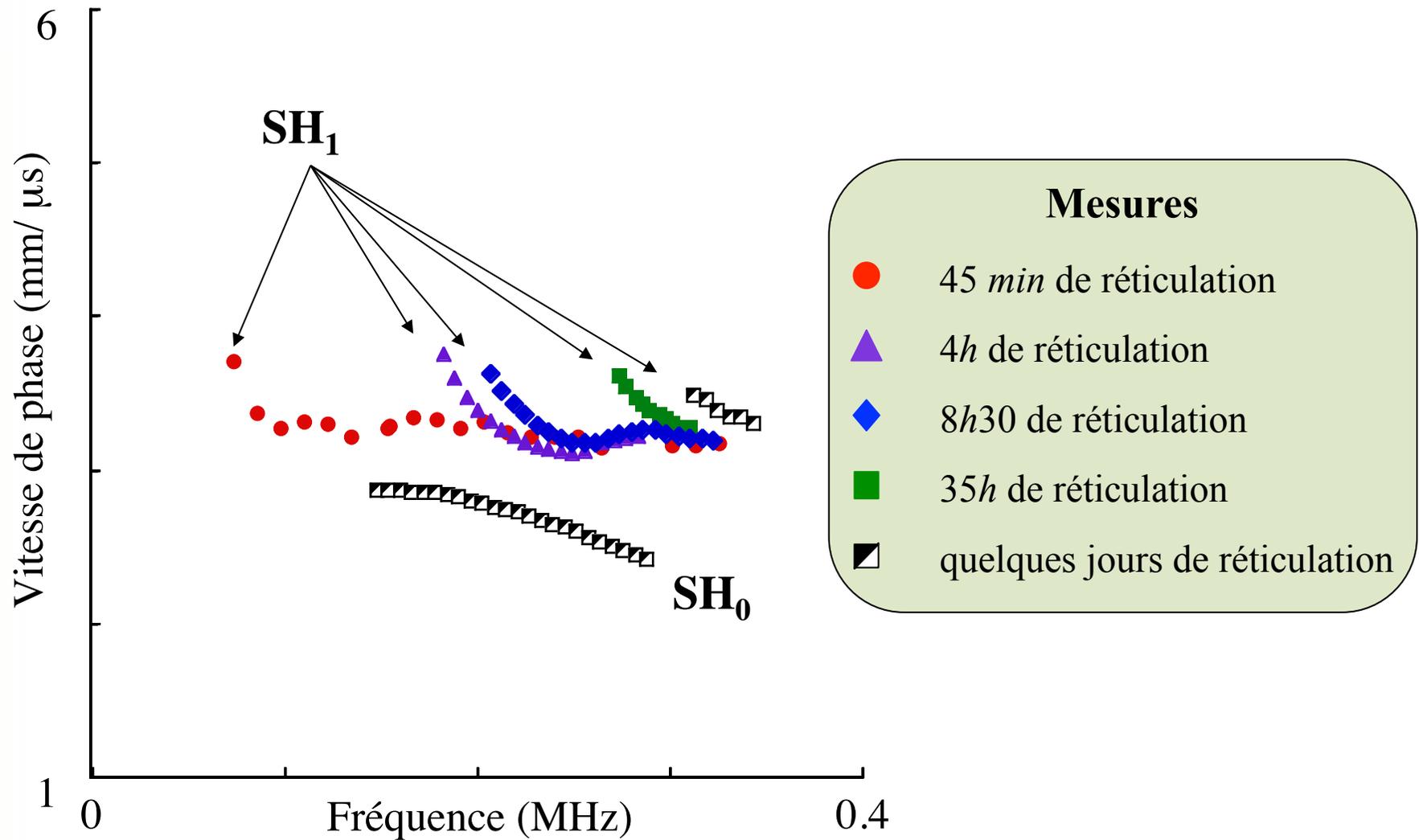
Les vitesses de phase des mode SH<sub>0</sub> et SH<sub>1</sub> autour et en dessous de  $F_{SH1}^c$  sont suffisamment sensibles aux propriétés de la colle pour envisager une END

**Objectif** → Mesurer Vph des modes SH<sub>0</sub> et SH<sub>1</sub> pour  $0 < f \leq F_{SH1}^c$   
et utiliser ces mesures dans un problème inverse => module de Coulomb ( $G$ ) de la colle

## Dispositif expérimental



## Résultat des mesures

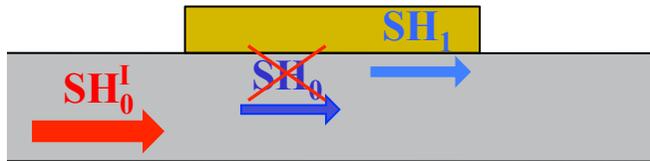


La couche de colle est épaisse de 0,1 mm

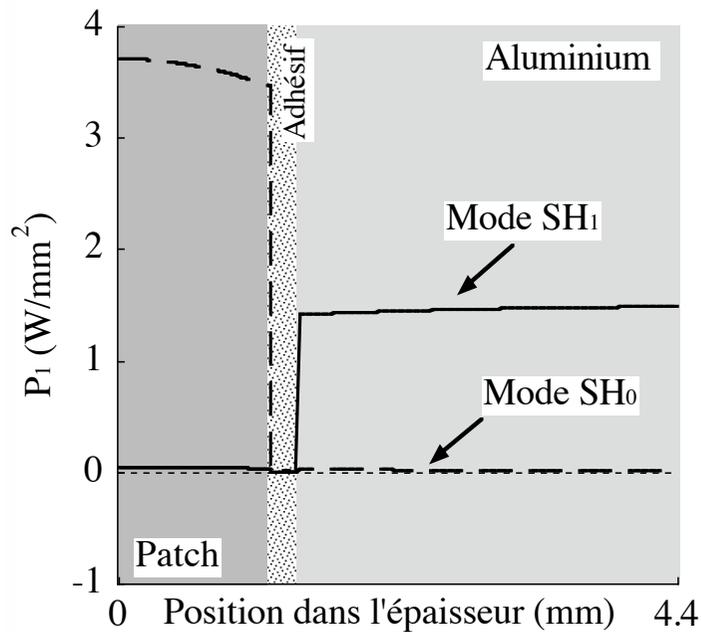
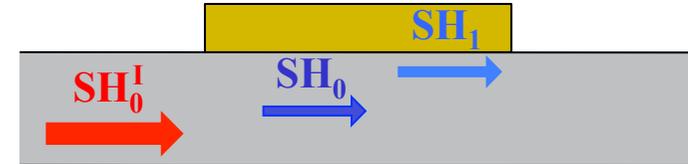
# Comprendre les mesures

*Pourquoi les modes  $SH_0$  et  $SH_1$  ne sont-ils pas toujours détectés tous les deux ?*

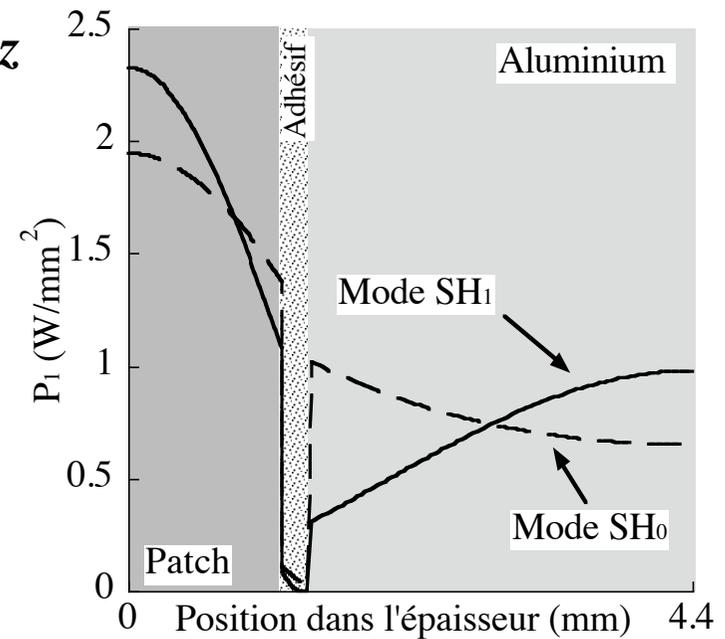
Niveau faible de cohésion



Niveau fort de cohésion



à 200 kHz

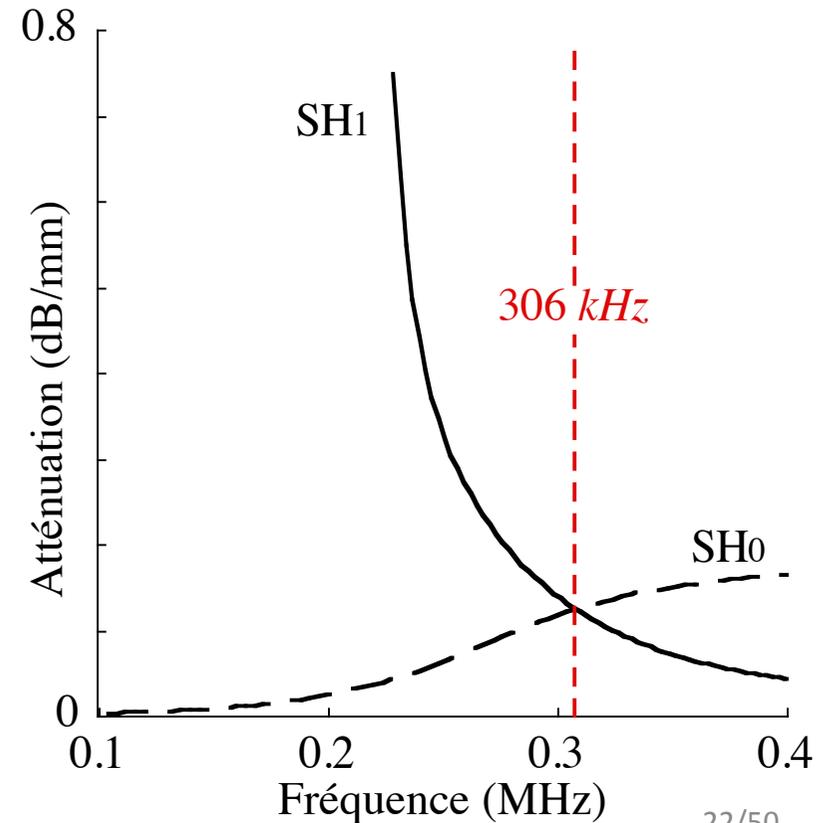
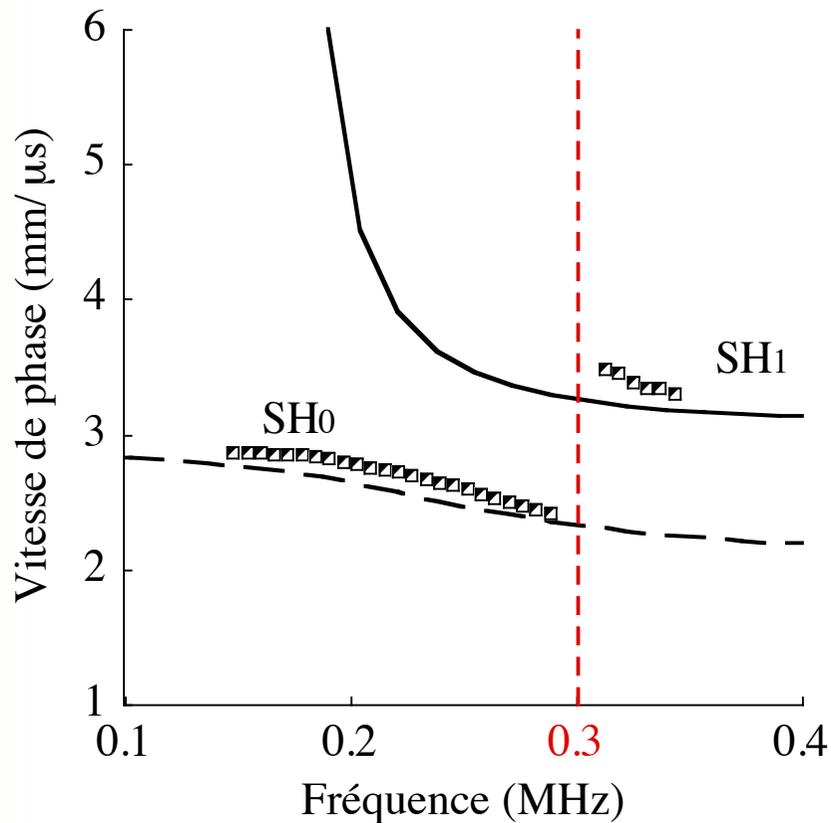
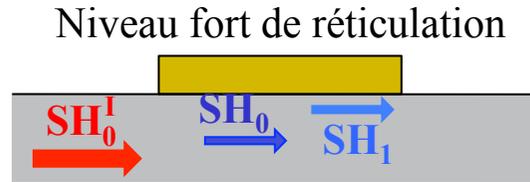


Le mode  $SH_0$  de l'assemblage n'est pas couplé avec le mode  $SH_0$  incident depuis l'aluminium

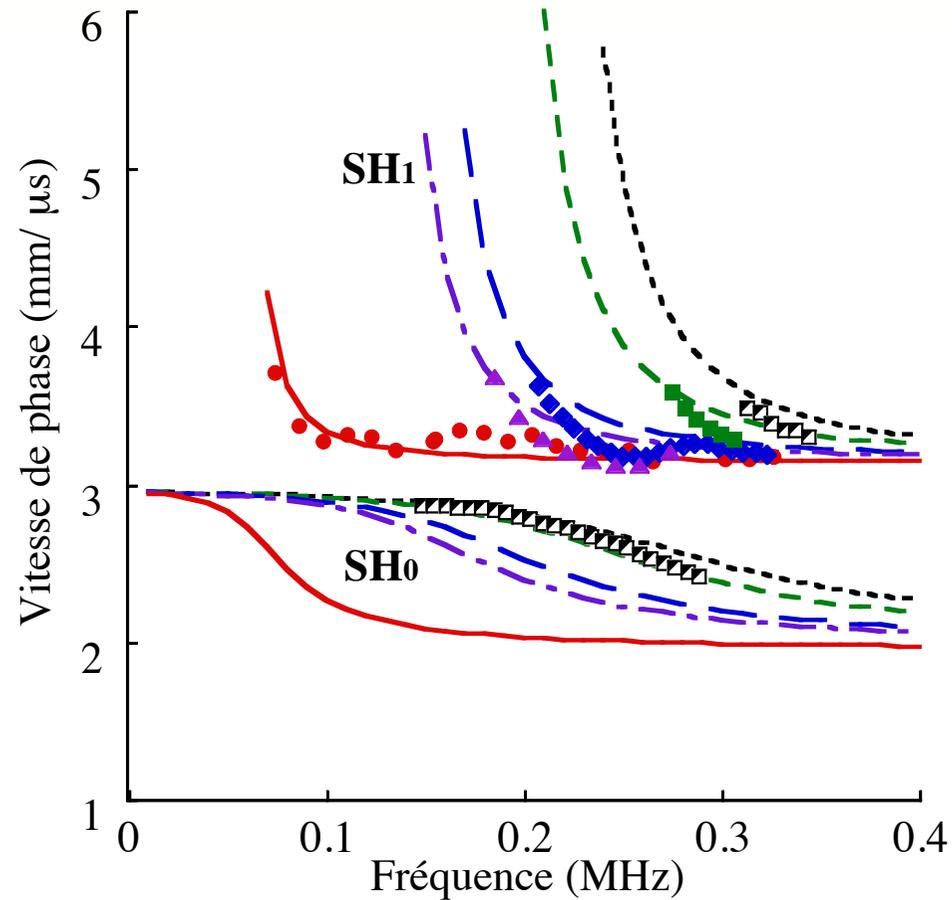
Les modes  $SH_1$  et  $SH_0$  de l'assemblage sont couplés avec le mode  $SH_0$  incident depuis l'aluminium

# Comprendre les mesures

*Pourquoi les modes  $SH_0$  et  $SH_1$  ne sont-ils pas tous les deux détectés dans toute la gamme de fréquences quand l'adhésif est réticulé ?*

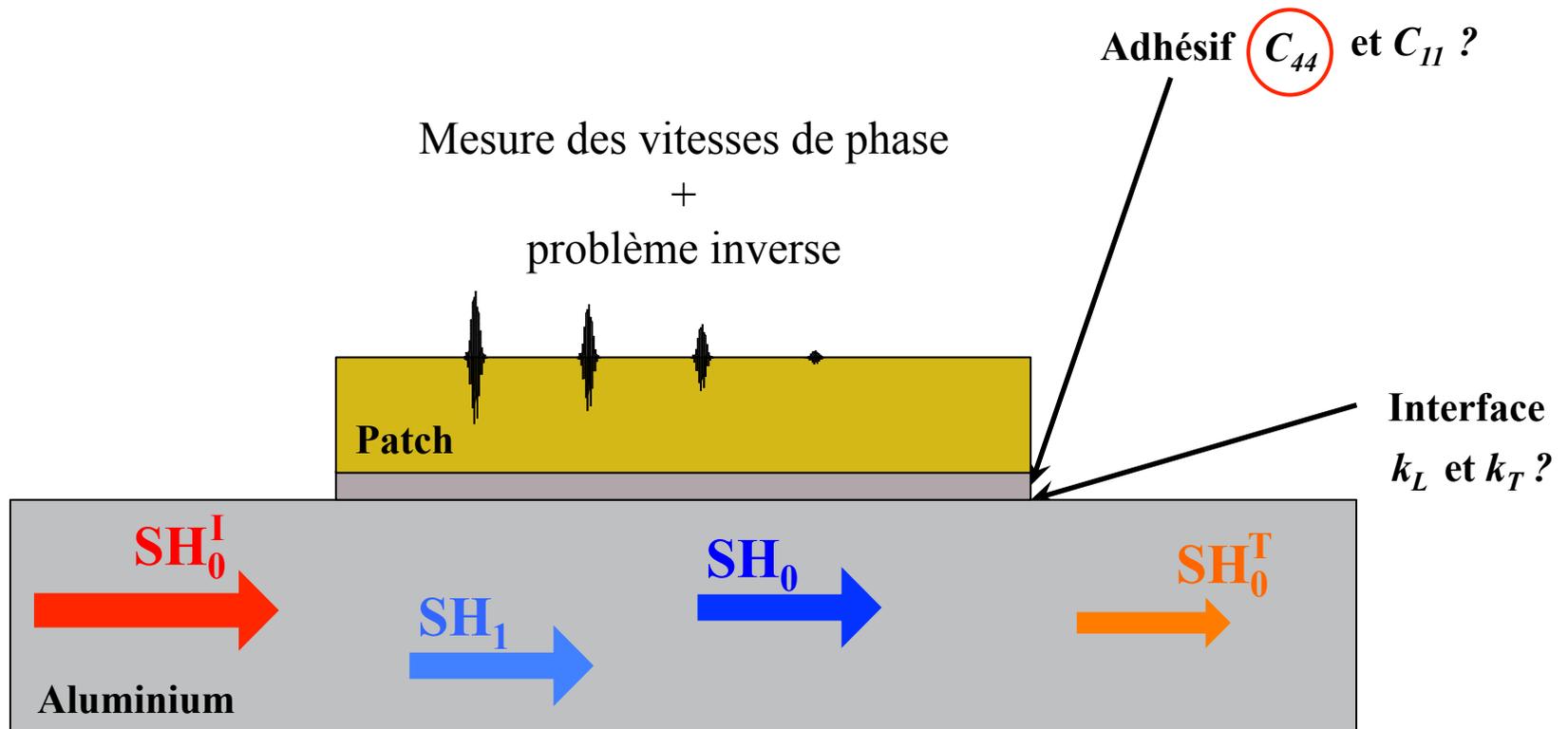


## Le problème inverse



Temps de réticulation	45 min	4h	8h30	35h	Quelques jours
$C_{44}$ optimisé (GPa)	0,02	0,13	0,18	0,35	0,53

# Synthèse



# Plan de la présentation

## I. Contexte de l'étude

## II. Les ondes SH pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Dispositif expérimental / Mesures*
- ✓ *Problème inverse*

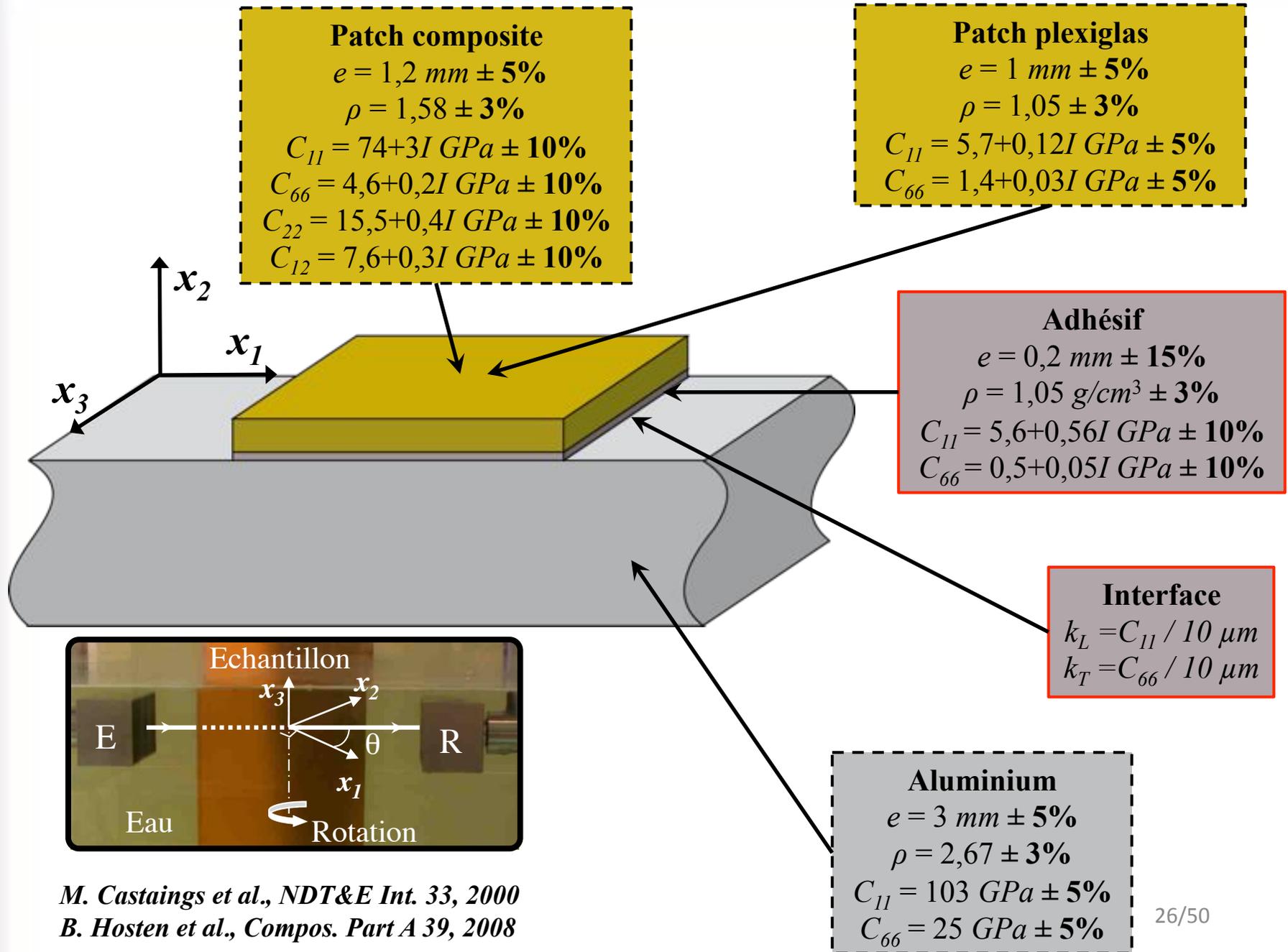
## III. Les ondes de Lamb pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Transmission d'une onde par une zone collée : simulations, mesures*
- ✓ *Vers la résolution d'un problème inverse*

## IV. Essais non destructifs / Essais mécaniques

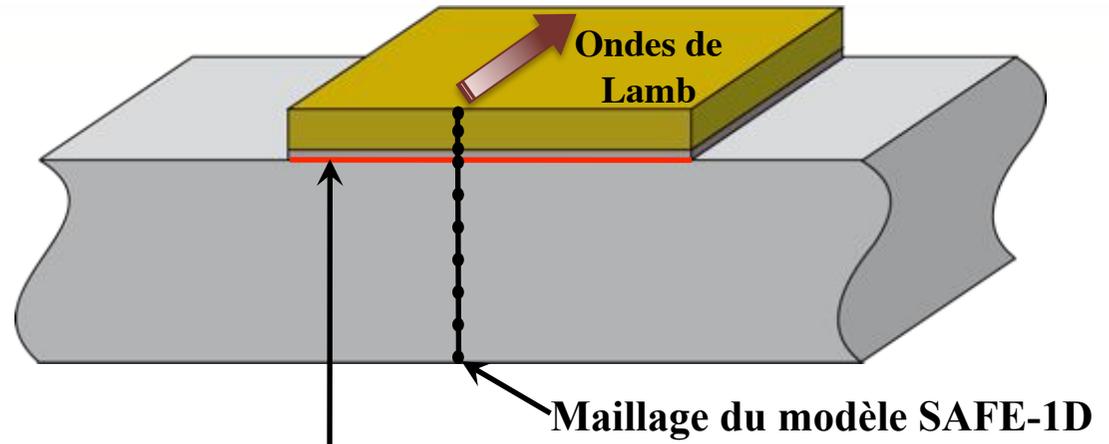
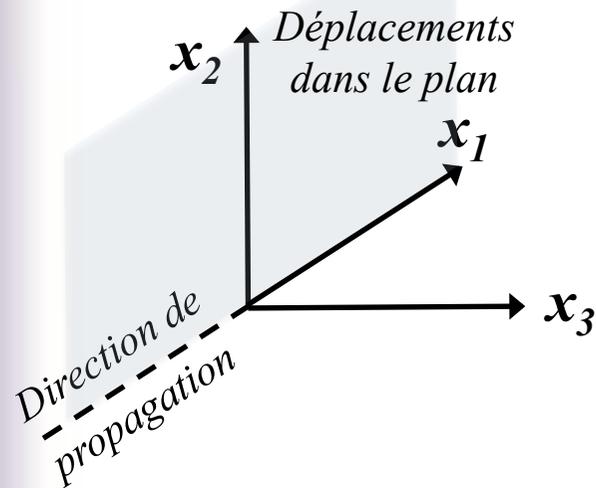
## V. Conclusions et perspectives

# La géométrie et les propriétés matériaux



M. Castaings et al., *NDT&E Int.* 33, 2000  
 B. Hosten et al., *Compos. Part A* 39, 2008

# Le calcul des courbes de dispersion et des champs



Modèle de Jones :  $\sigma = k_{L,T} \Delta u$

On considère un déplacement de la forme : 
$$U(x_1, x_2, x_3, t) = \begin{pmatrix} u_1(x_2) e^{I(\omega t - kx_1)} \\ u_2(x_2) e^{I(\omega t - kx_1)} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad I^2 = -1$$

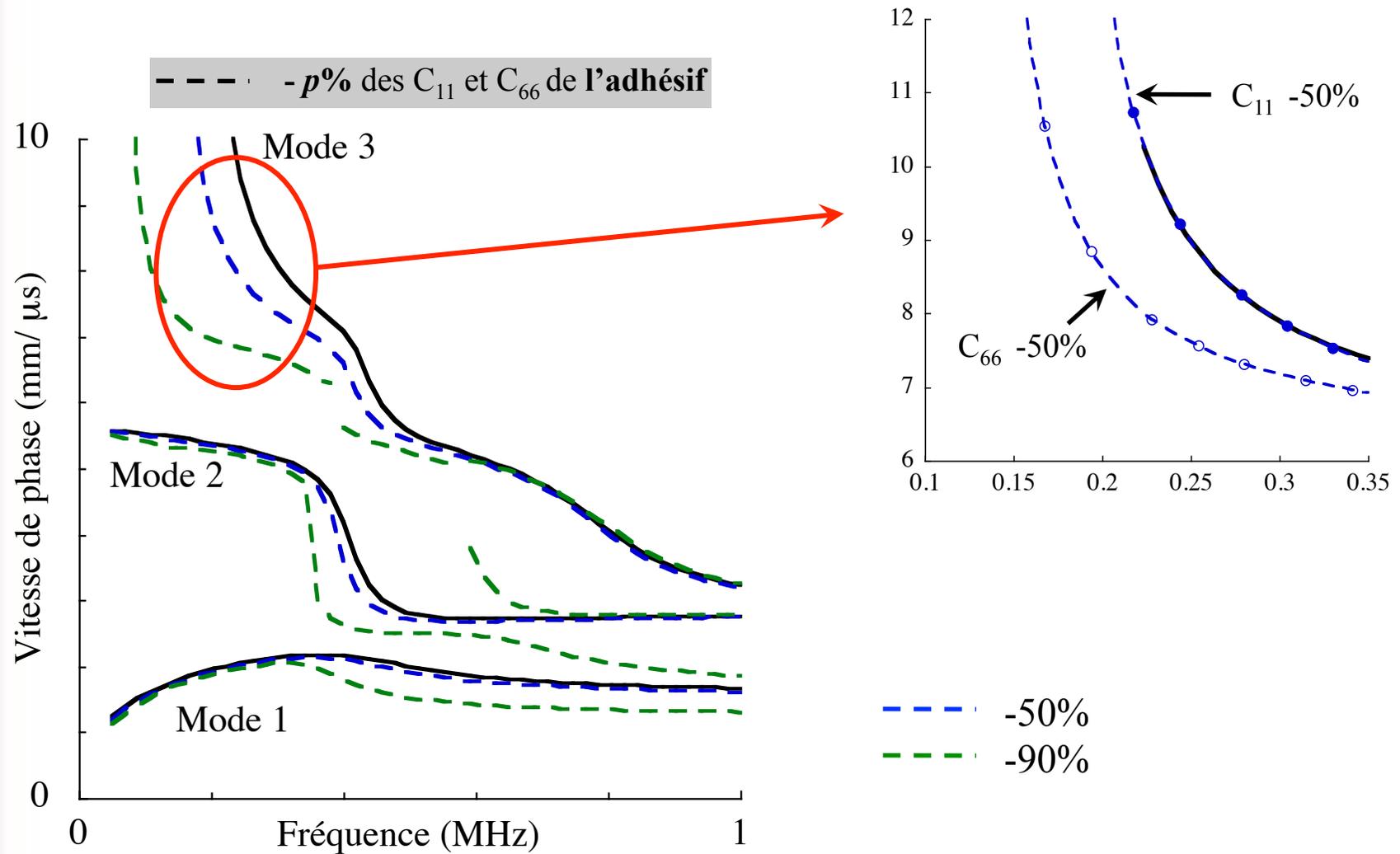
Dans ce cas le problème aux valeurs propres dans le domaine s'écrit :

$$C_{i_2 j_2} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_2^2} + I(C_{i_1 j_2} + C_{i_2 j_1}) \frac{\partial (ku_j)}{\partial x_2} - kC_{i_1 j_1} (ku_j) + \rho \omega^2 u_j \delta_{ij} = 0 \quad \text{où } i=1, 2 \text{ et avec sommation sur } j=1, 2$$

et la condition aux frontières du domaine s'écrit :

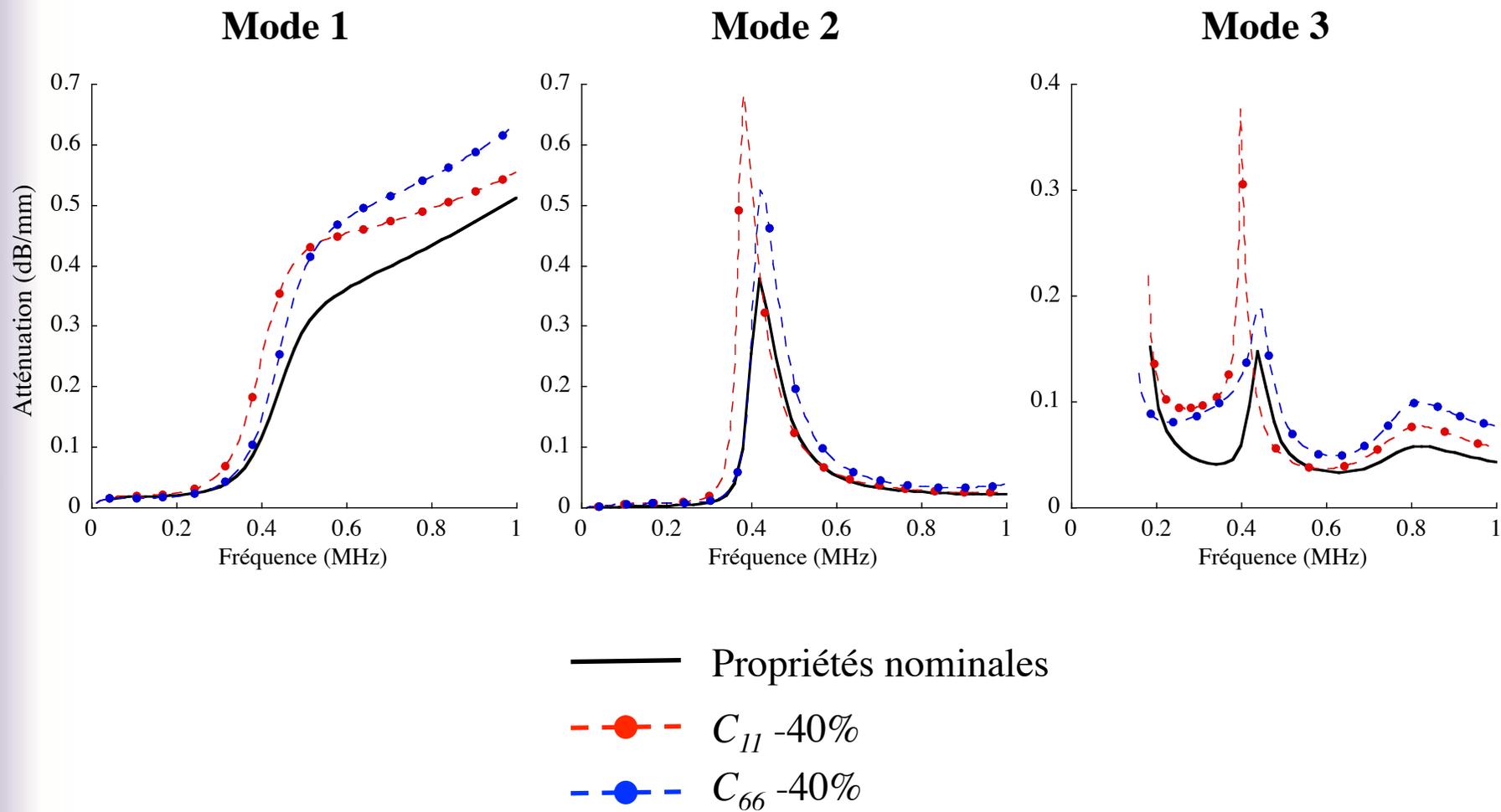
$$T_i = C_{i_2 j_2} \frac{\partial u_j}{\partial x_2} n_2 + IC_{2kj_1} (ku_j) n_2 \quad \text{où } i=1, 2 \text{ et avec sommation sur } j=1, 2$$

# Etude de la sensibilité des ondes de Lamb aux propriétés d'un collage



$F_{M3}^c$  de l'assemblage n'est pas sensible à une variation du  $C_{11}$  de la colle  
 →  
 nécessité de trouver une autre grandeur ultrasonore qui y est sensible

# Etude de la sensibilité des ondes de Lamb aux propriétés d'un collage



# Etude de la sensibilité des ondes de Lamb aux propriétés d'un collage

Sensibilité des vitesses de phase

Sensibilité de la fréquence de coupure du Mode 3  
au  $C_{66}$  de l'adhésif

Sensibilité des atténuations

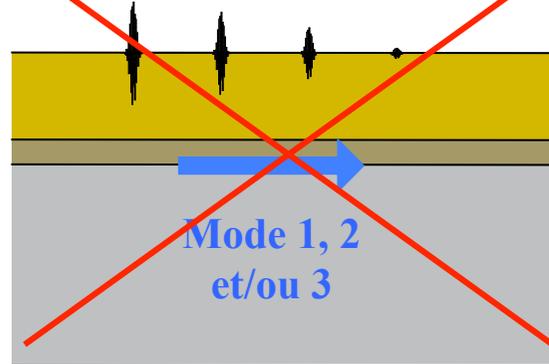
Les atténuations des Modes 1, 2 et 3 semblent  
permettre une évaluation de propriétés de la colle  
pour  $f < 0,6 \text{ MHz}$

Sensibilité aux  $k_L$  et  $k_T$  de l'interface

Trop faible sensibilité

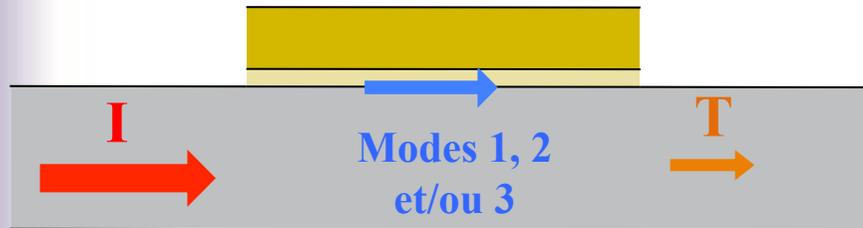
## Comment exploiter cette sensibilité de l'atténuation ?

Mesure de la décroissance de l'amplitude



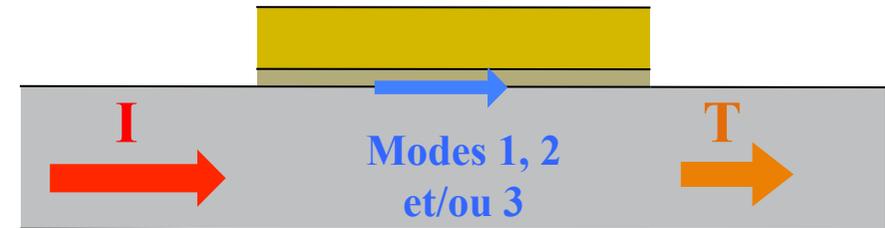
Etat 1 de la colle

=> Niveau 1 de l'atténuation de la colle



Etat 2 de la colle

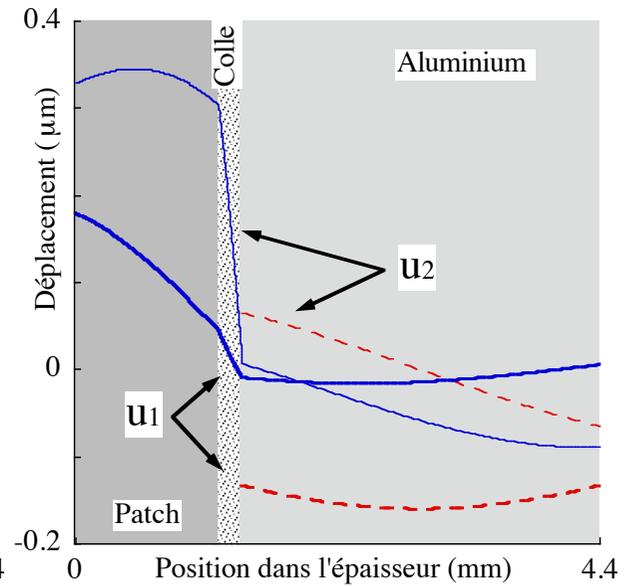
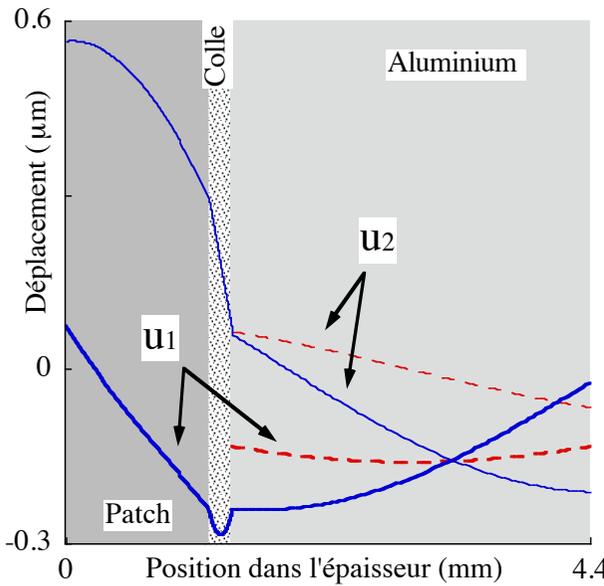
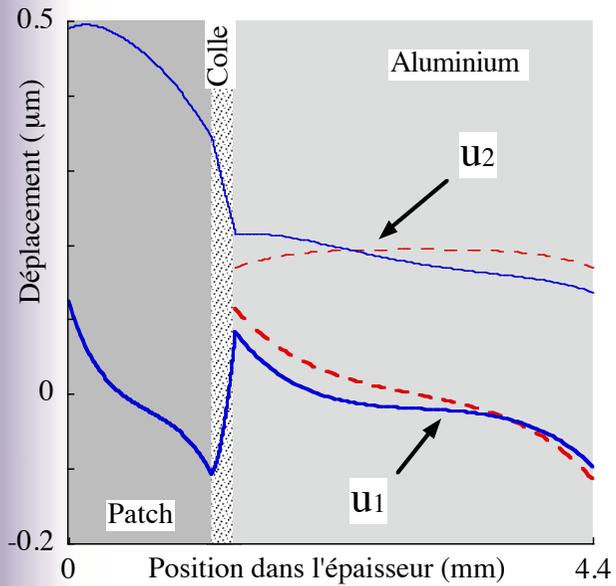
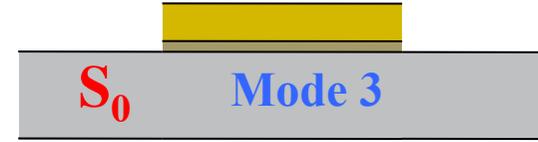
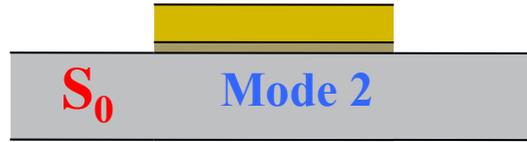
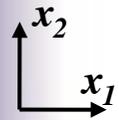
=> Niveau 2 de l'atténuation de la colle



**Comment évolue le coefficient de transmission en fonction des propriétés cohésives de la colle ?**

**Comment choisir le mode incident ?**

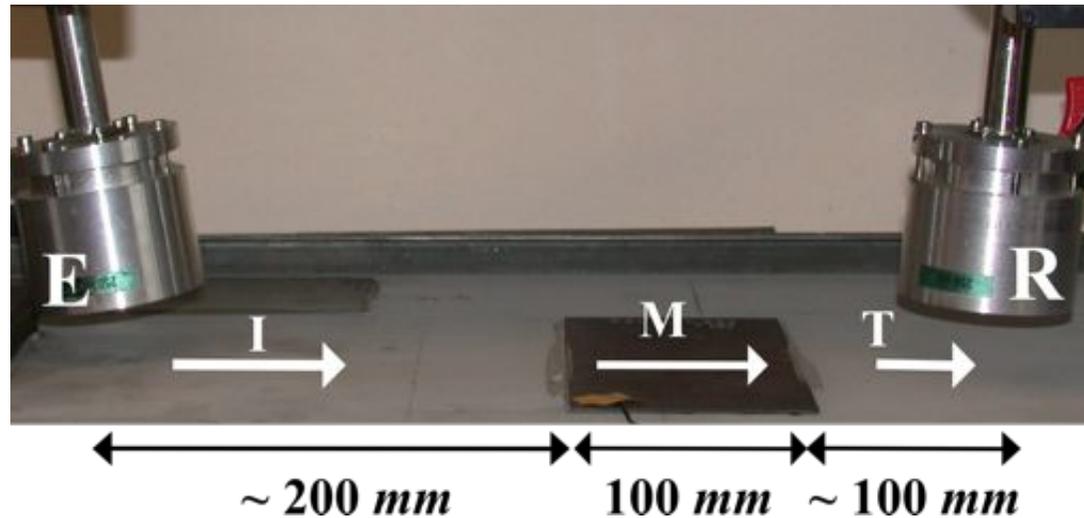
# Choix du mode incident à 400 kHz



- Mode A<sub>0</sub> incident depuis l'aluminium → Mode 1 de l'assemblage
- Mode S<sub>0</sub> incident depuis l'aluminium → Modes 2 et 3 de l'assemblage

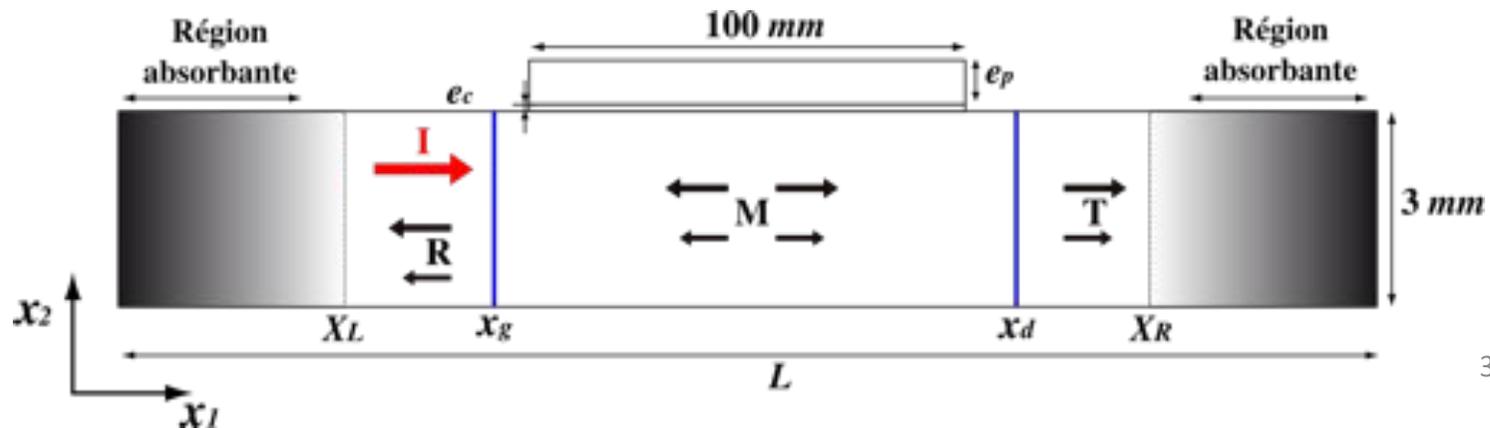
# Principe des simulations numériques / Dispositif expérimental

## Les mesures

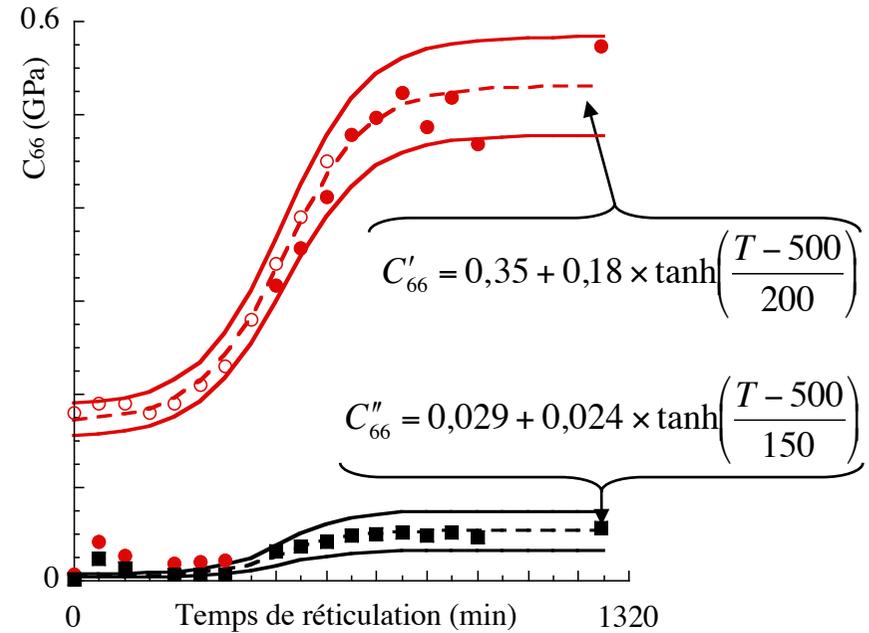
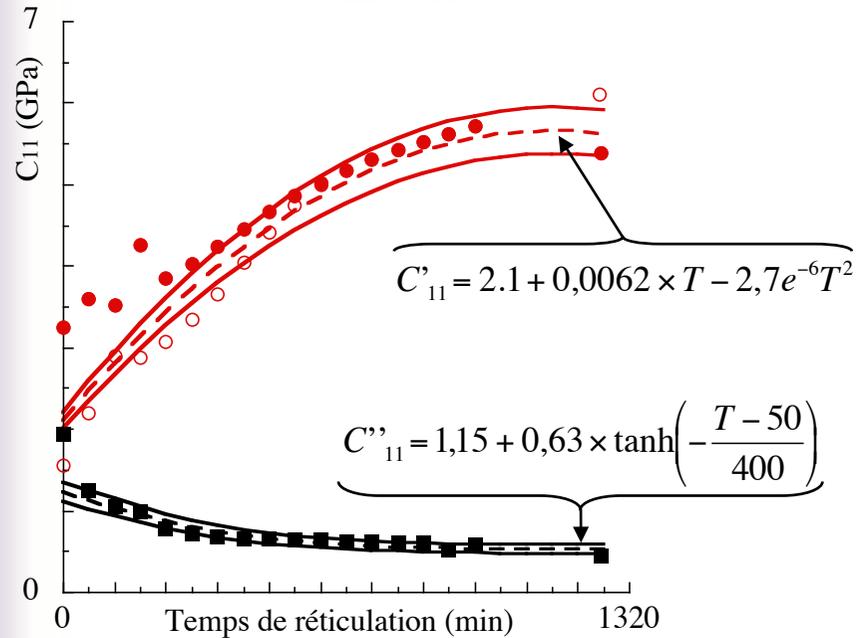
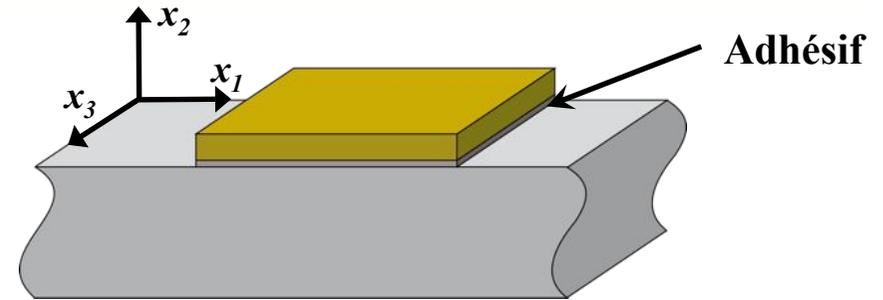
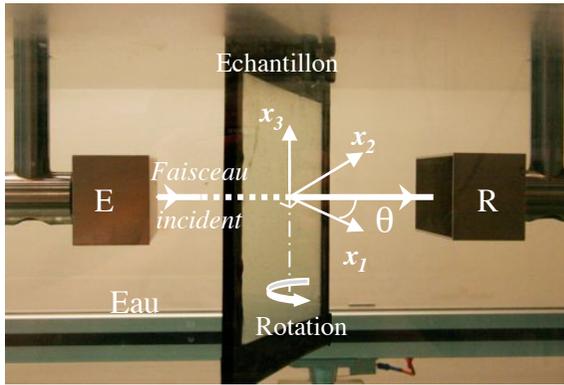


Coefficients de transmission  $\rightarrow t_{A_0} = \left| \frac{Ampl_{A_0}^T}{Ampl_{A_0}^I} \right| \quad t_{S_0} = \left| \frac{Ampl_{S_0}^T}{Ampl_{S_0}^I} \right|$

## Les simulations

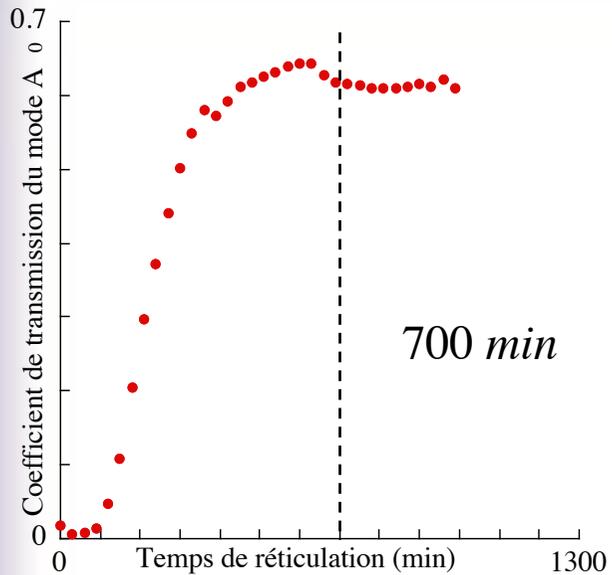


# Les propriétés de la colle pendant le processus de réticulation



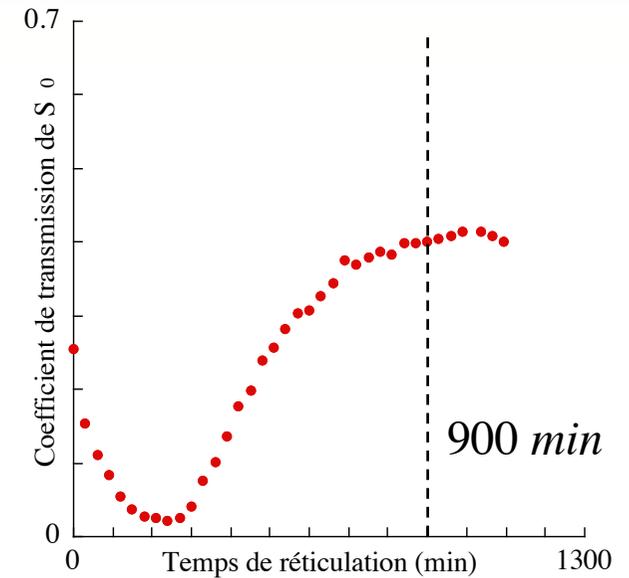
- ■ Mesures n°1
- ■ Mesures n°2

# Mesures du coefficient de transmission (cas du patch en PLEXIGLAS)

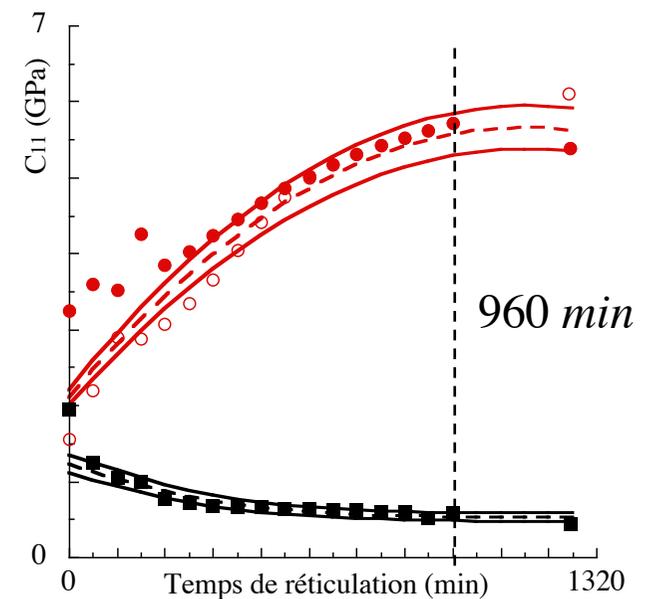
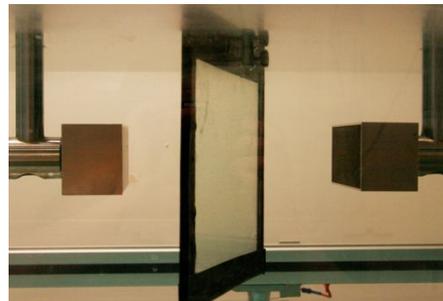
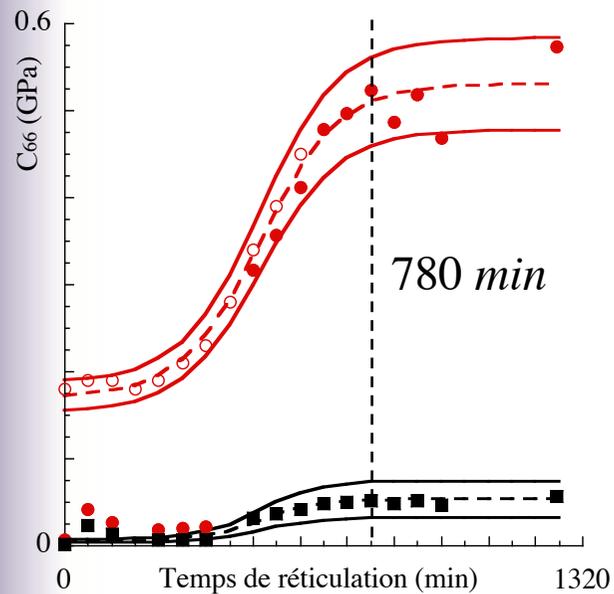


$A_0 / C_{66}$

à 400 kHz

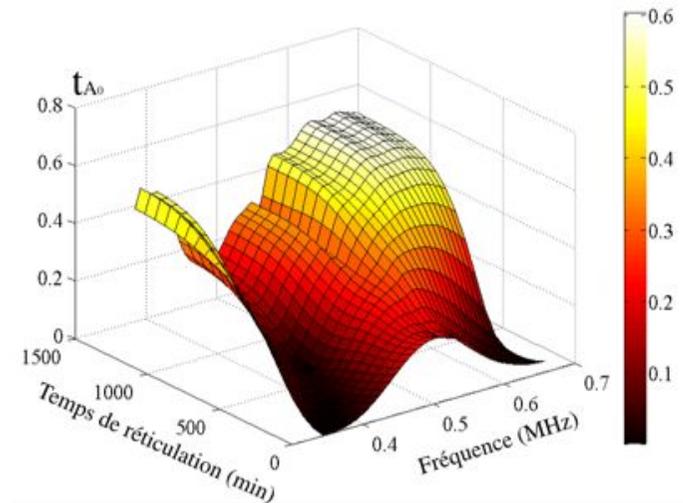
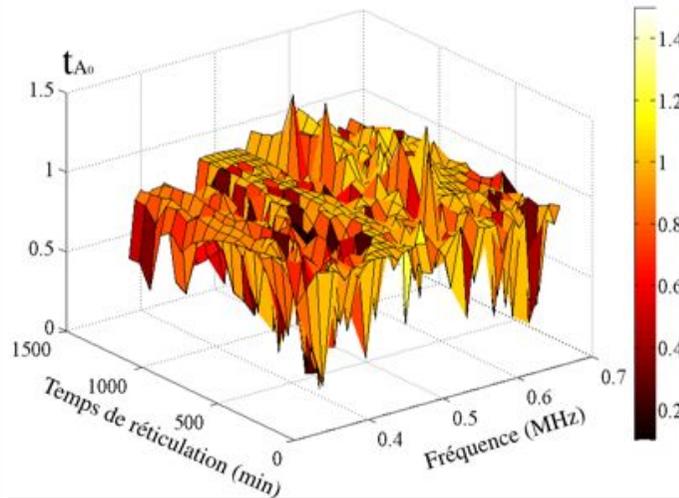


$S_0 / C_{11}$

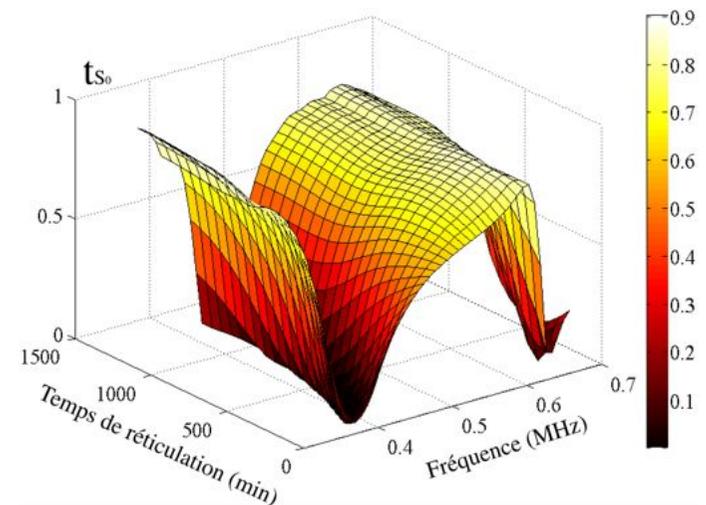
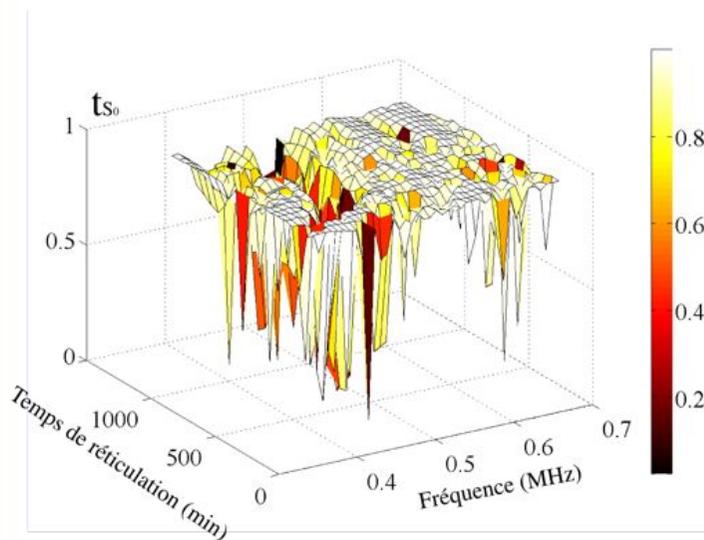


# Importance de la viscoélasticité (cas du patch en PLEXIGLAS)

Mode  $A_0$  incident

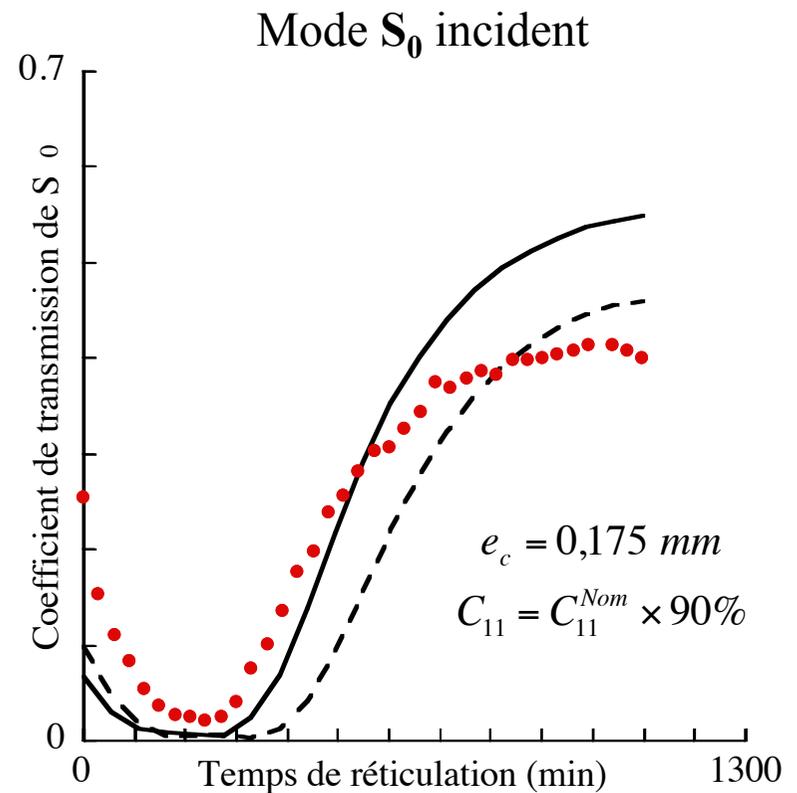
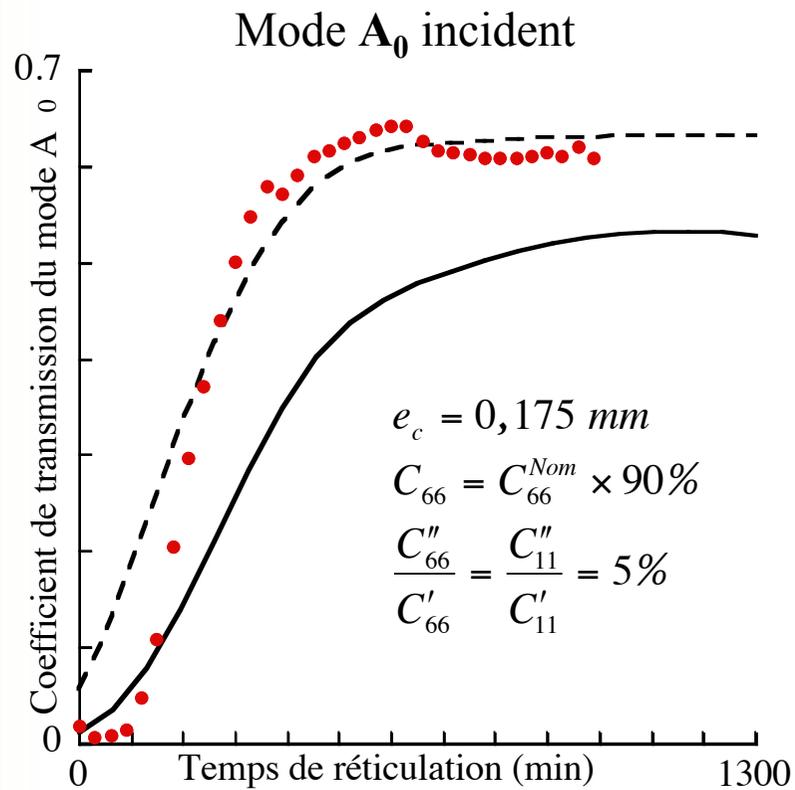


Mode  $S_0$  incident



# Vers la résolution du problème inverse (patch en PLEXIGLAS)

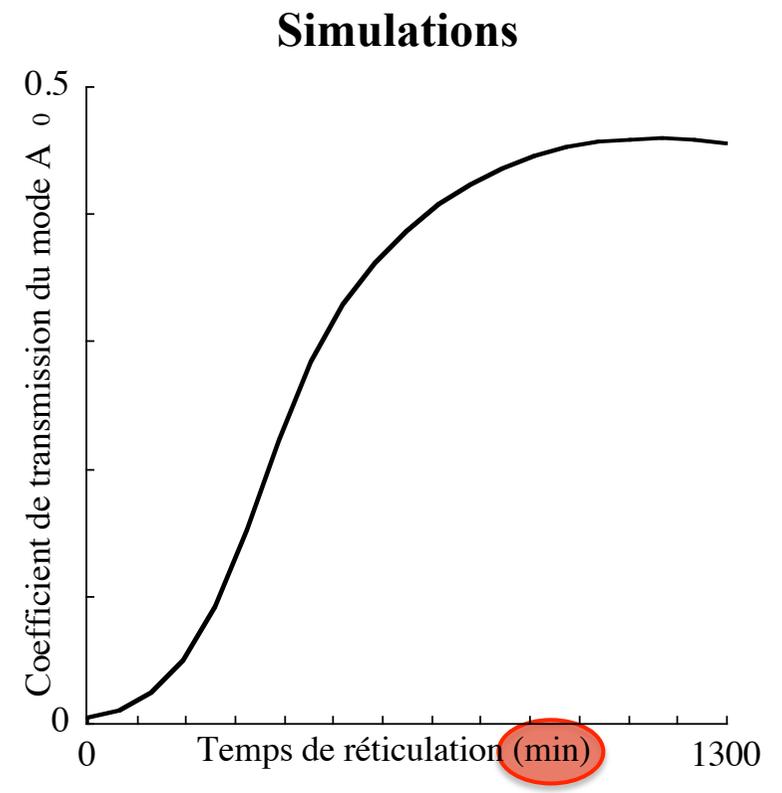
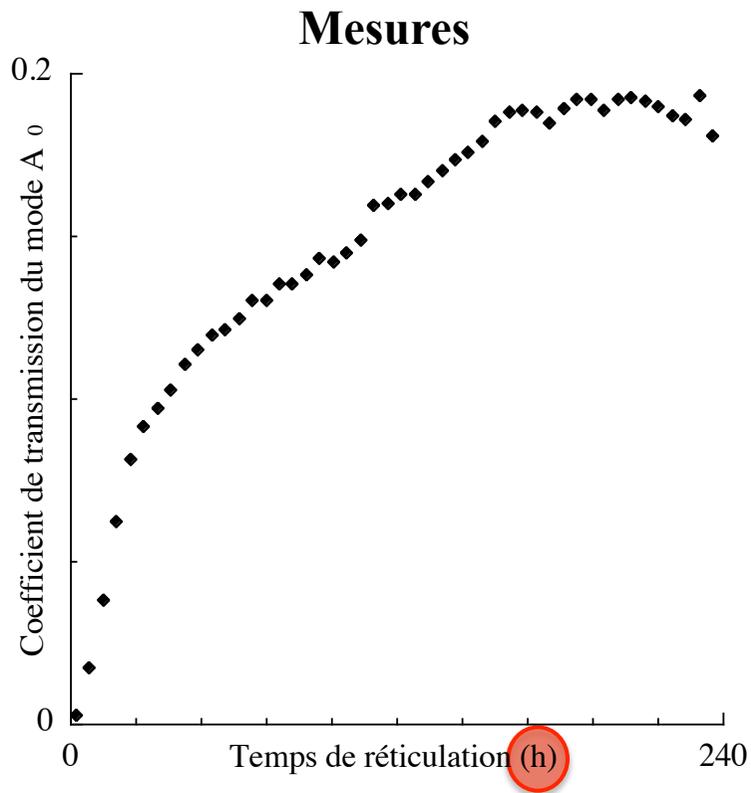
Joint de colle de **0,2 mm**  
aluminium **sablé**



- mesures
- simulations avec des propriétés initiales
- - - simulations avec des propriétés ajustées

# Mesures du coefficient de transmission (patch en COMPOSITE)

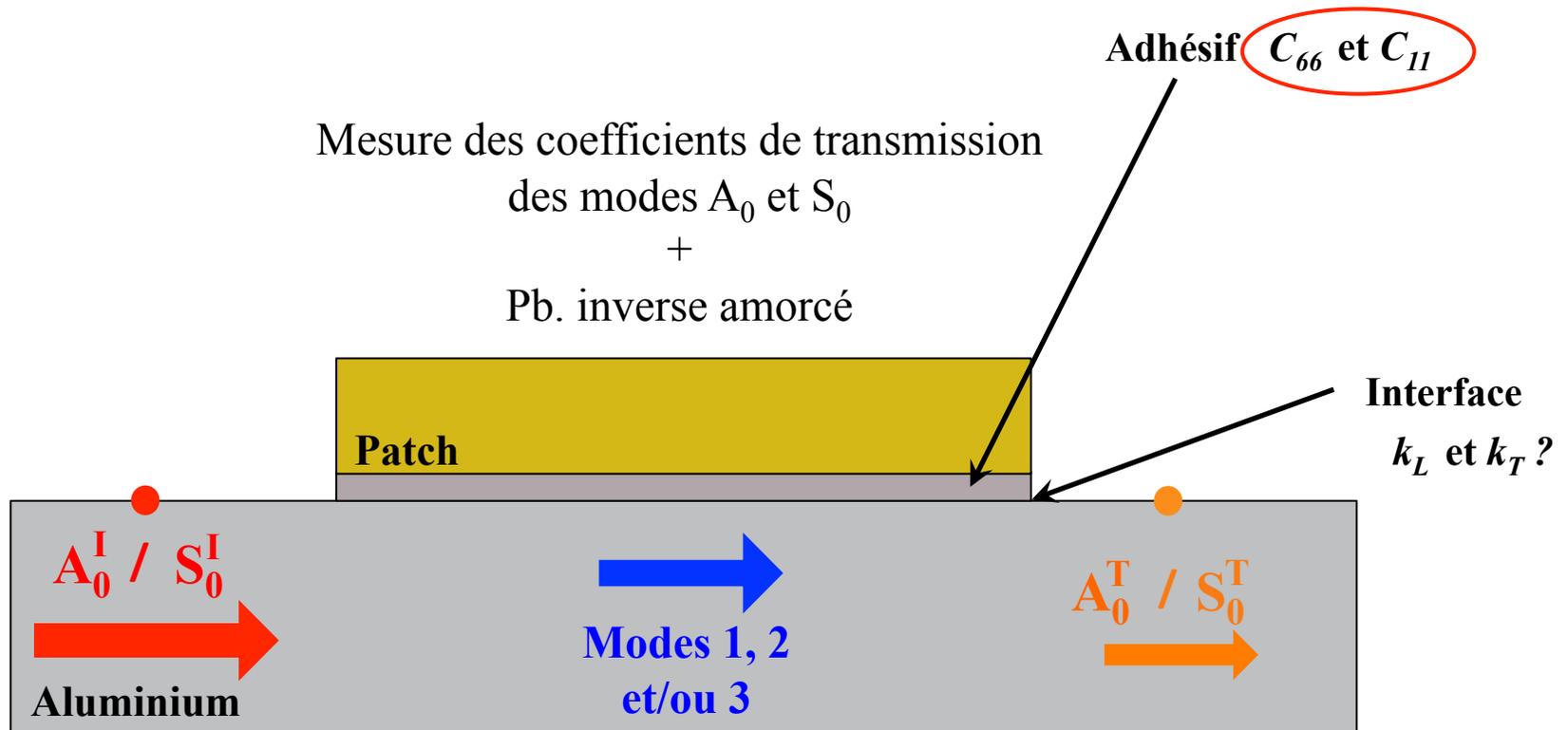
Mode  $A_0$  incident  
Joint de colle de  $0,2 \text{ mm}$   
Aluminium sablé



= 21h40

Ralentissement du processus de réticulation → Imprégnation de la colle dans le composite ?

# Synthèse



# Plan de la présentation

## I. Contexte de l'étude

## II. Les ondes SH pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Dispositif expérimental / Mesures*
- ✓ *Problème inverse*

## III. Les ondes de Lamb pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Transmission d'une onde par une zone collée : simulations, mesures*
- ✓ *Vers la résolution d'un problème inverse*

## IV. Essais non destructifs / Essais mécaniques

## V. Conclusions et perspectives

# Objectif

Mesures non destructives



$C_{11}$  et/ou  $C_{66}$

Mesures destructives



*Force d'arrachement*

**Confrontation**

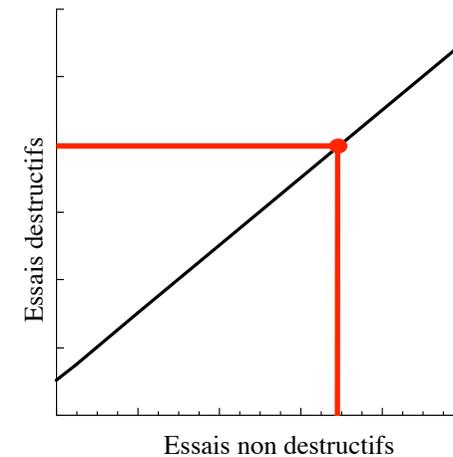


**Corrélation ?**

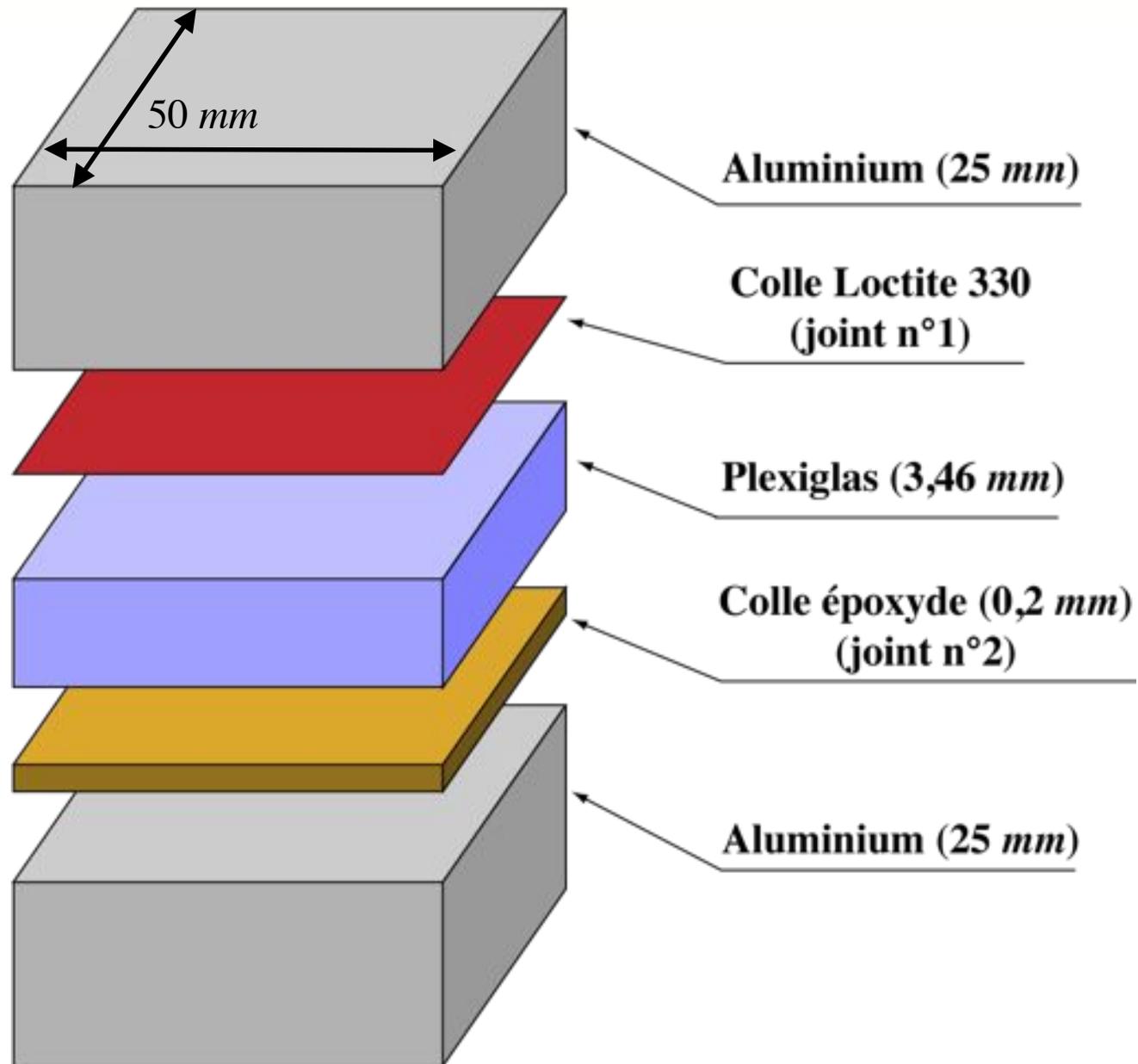
**Si oui**



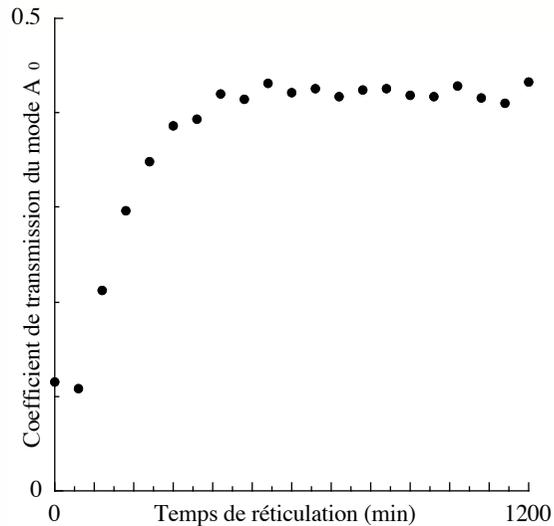
Remplacement des essais destructifs  
par des essais non destructifs



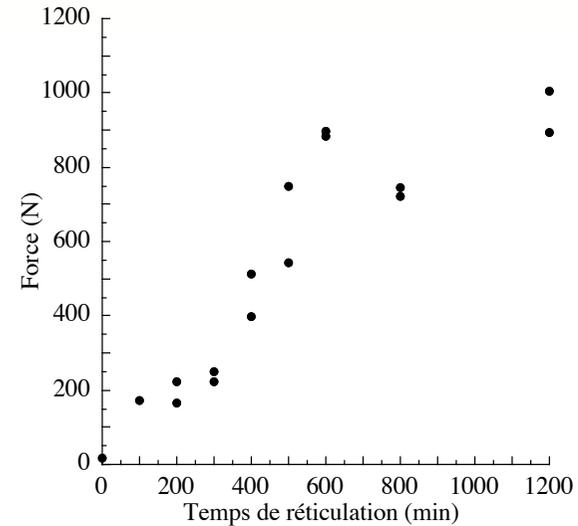
## Présentation des éprouvettes de traction uni axiale



# Confrontation essai US / traction (patch en PLEXIGLAS)



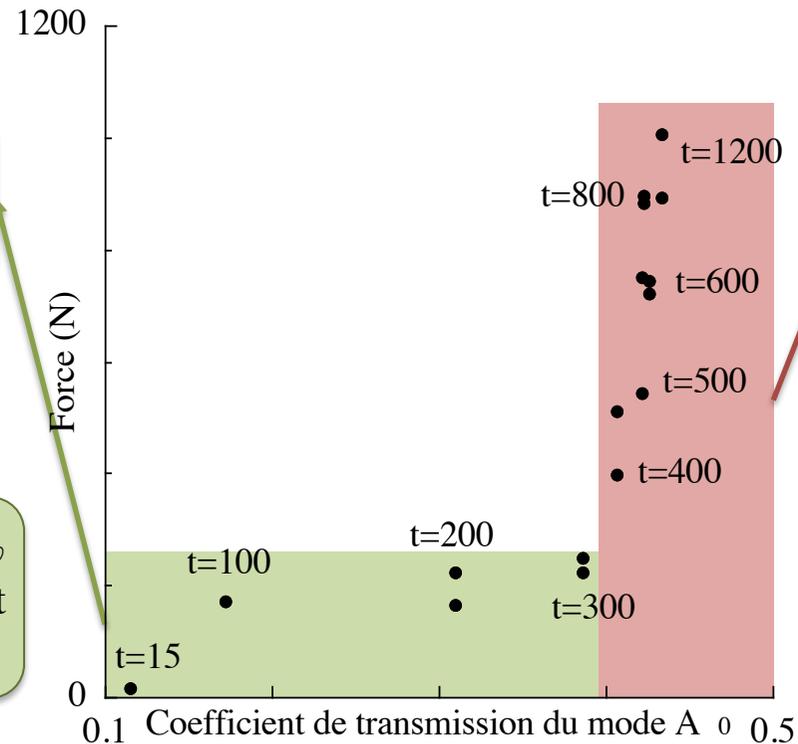
Confrontation



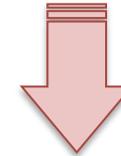
Forte variation de  $t_{A0}$  mais pas de la force d'arrachement



Si  $t_{A0}$  est déterminé à  $\pm 5\%$  près alors  $F$  peut est estimée à  $\pm 6\%$  près!

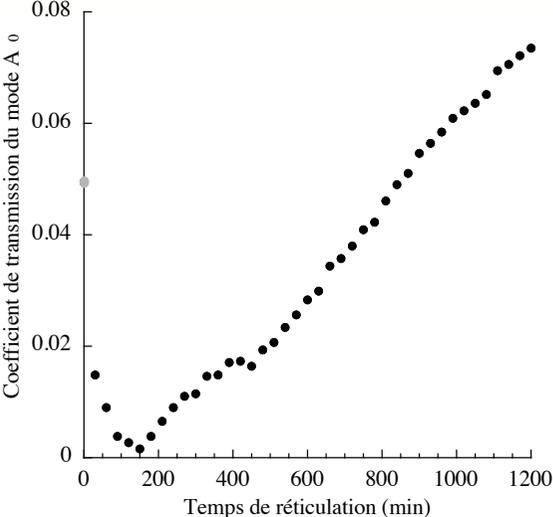


Faible variation de  $t_{A0}$  pour une forte variation de la force d'arrachement

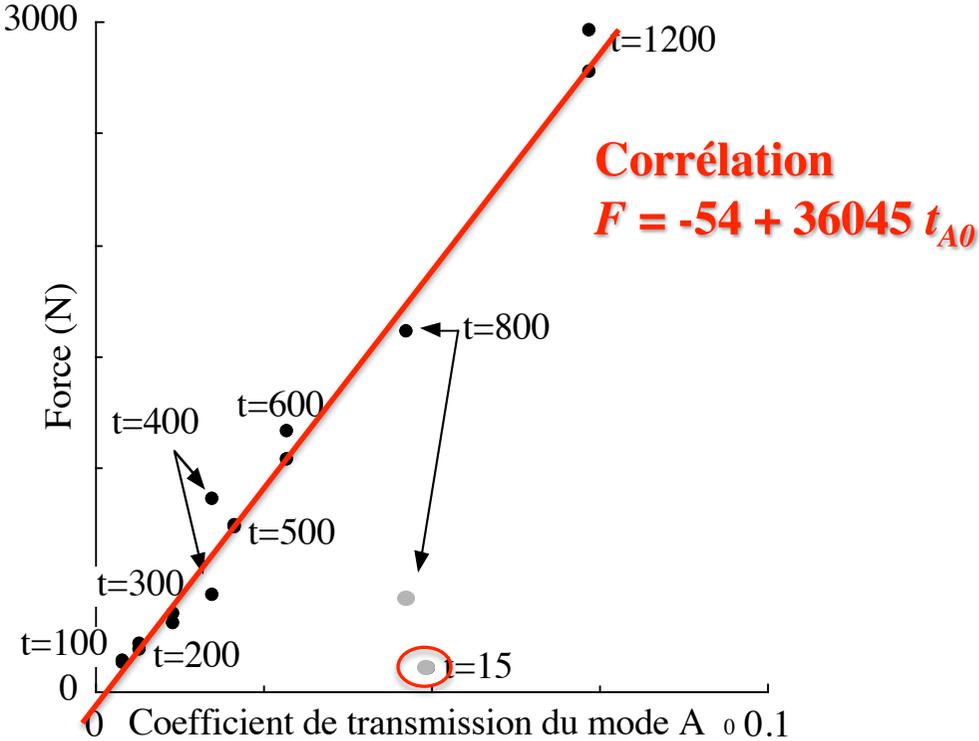
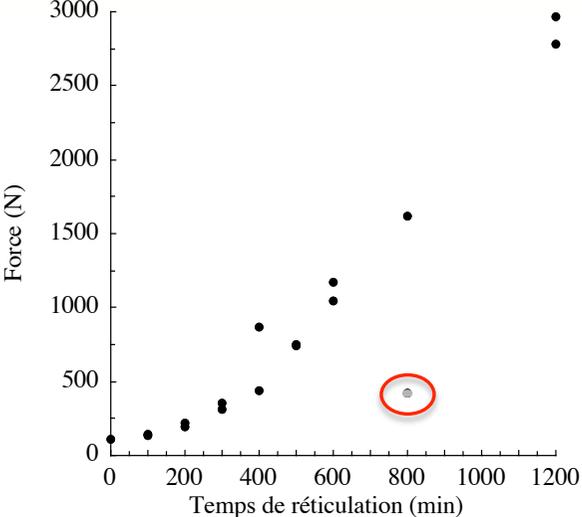
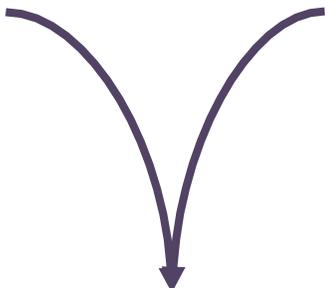


Si  $t_{A0}$  est déterminé à  $\pm 5\%$  près alors  $F$  peut est estimée à  $\pm 30\%$  près!

# Confrontation essai US / traction (patch en COMPOSITE)



**Confrontation**



# Plan de la présentation

## I. Contexte de l'étude

## II. Les ondes SH pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Dispositif expérimental / Mesures*
- ✓ *Problème inverse*

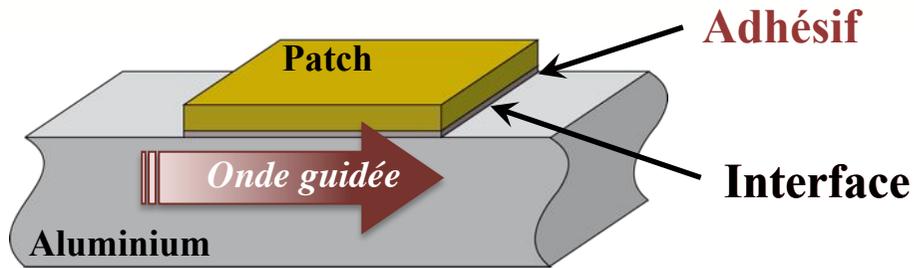
## III. Les ondes de Lamb pour tester le collage

- ✓ *Géométrie et propriétés matériaux*
- ✓ *Calcul des courbes de dispersion et des champs des modes*
- ✓ *Etude de sensibilité*
- ✓ *Transmission d'une onde par une zone collée : simulations, mesures*
- ✓ *Vers la résolution d'un problème inverse*

## IV. Essais non destructifs / Essais mécaniques

## V. Conclusions et perspectives

# Conclusions



Objectif →  
Evaluer la qualité du collage

Etude de sensibilité

- 3 modes SH
- 5 à 7 modes de Lamb

Pas de sensibilité suffisante  
aux propriétés de  
l'interface aluminium/colle

$V_{ph}$   $SH_0$  et  $SH_1$  autour de  
 $F_{SH1}^c$  sensibles aux  
propriétés du joint de colle

Estimation de  $G$

$t_{A0}$  et  $t_{S0}$  sensibles aux  
propriétés du joint de colle  
et à son épaisseur entre  
**300 et 550 kHz**

**Pb. fortement amorcé** et  
l'étude doit encore être  
approfondie

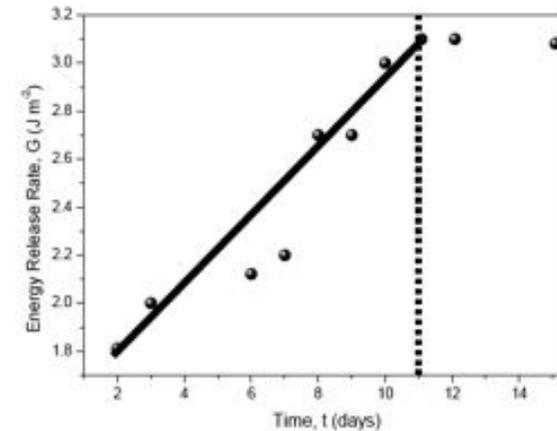
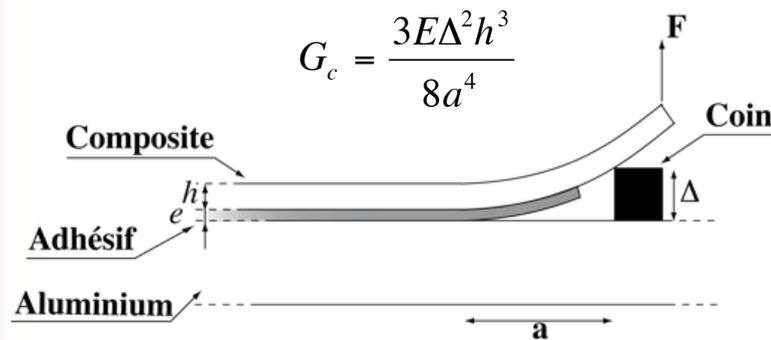
**Corrélation** essais US / traction uni axiale →  $F$  évolue linéairement en fonction de  $t_{A0}$   
(assemblage aluminium/colle/composite)

# Perspectives

En ce qui concerne l'évaluation des propriétés cohésives de la colle :



Confrontation des résultats obtenus avec les ondes guidées SH avec ceux obtenus par l'intermédiaire d'un « wedge test »



Energie critique de fracture  $G_c$  en fonction de la vitesse  $v$  de propagation du front de fissure

Les premiers résultats confirment une évolution des propriétés du joint pendant ~11 jours

## Perspectives

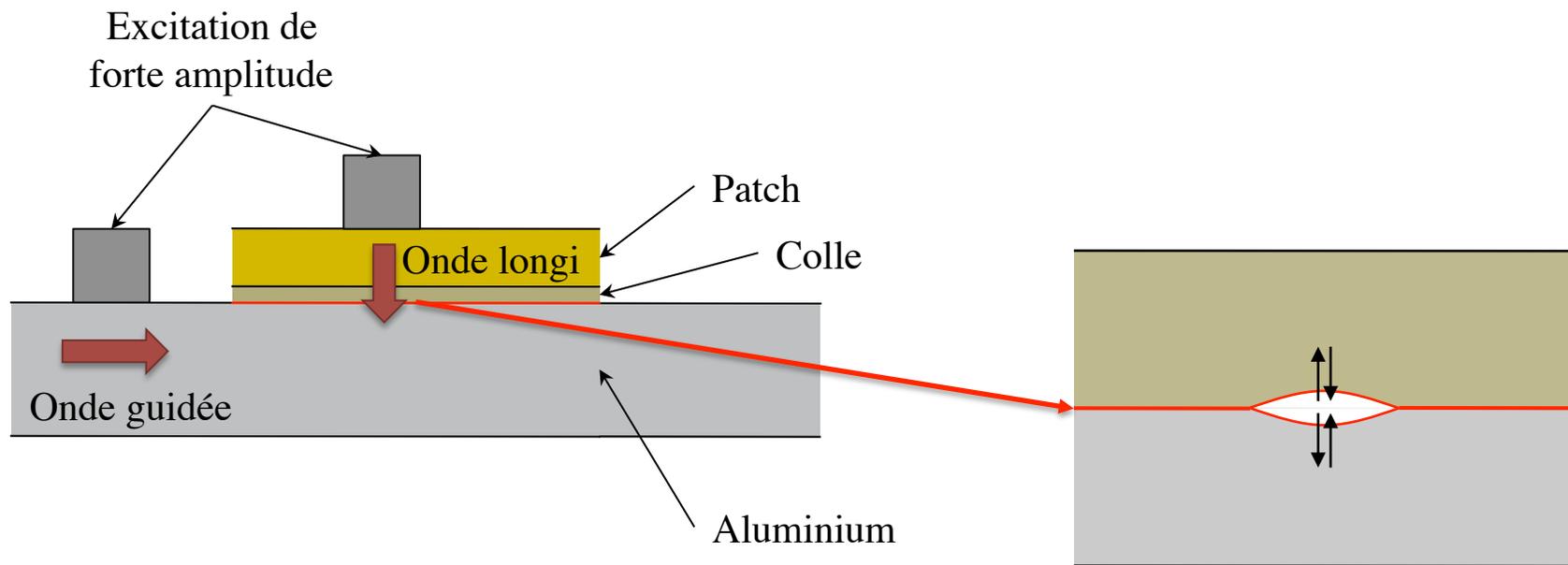
### **En ce qui concerne l'évaluation des propriétés cohésives de la colle :**

- ⇒ Comprendre pourquoi la colle réticule plus lentement lorsque le patch est en composite plutôt qu'en plexiglas
  
  - ⇒ Etablir dans quelle mesure l'étude est transposable à d'autres types d'assemblage
    - autre colle (par exemple de type Redux)
    - autre patch
    - autres matériaux
    - autre géométrie de patch
    - autre géométrie de collage
- etc.

## Perspectives

**En ce qui concerne l'évaluation des propriétés adhésives de la colle :**

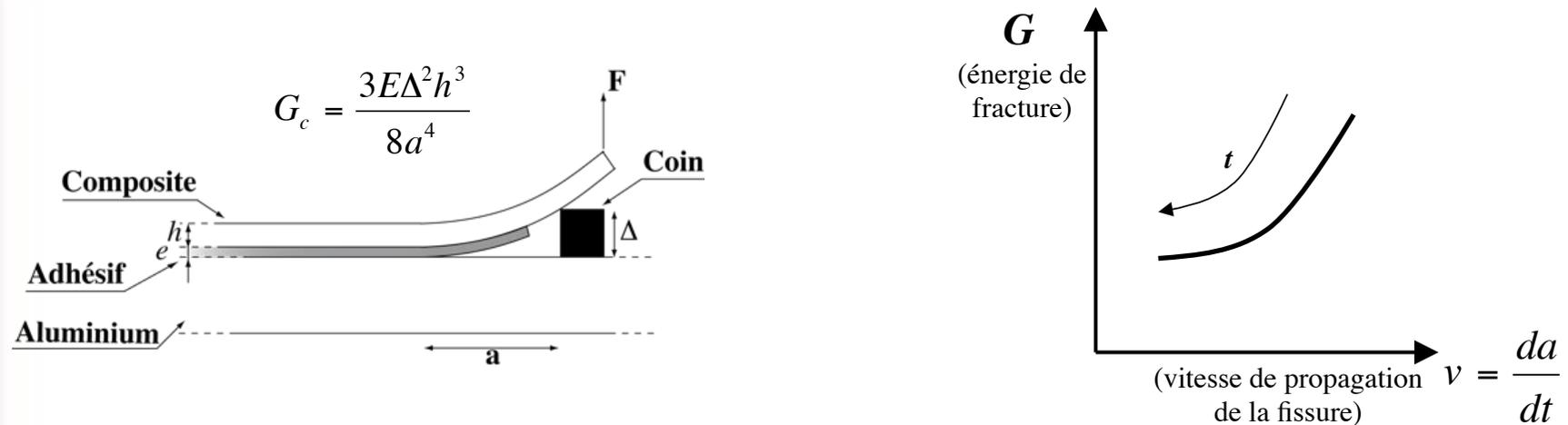
⇒ Exploiter la réponse non linéaire de l'interface aluminium/colle lorsqu'elle est soumise à une excitation ultrasonore de forte amplitude pour tenter de différencier plusieurs niveaux d'adhésion



**Merci**

# **Annexes**

## Confrontation essai US / « wedge test »



Energie critique de fracture  $G_c$  en fonction de la vitesse  $v$  de propagation du front de fissure

énergie nécessaire pour créer une unité de surface de fracture

Réaliser 1 test à différents moments de la réticulation  
pour une confrontation avec les essais US

Les premiers résultats confirment une évolution des propriétés du joint pendant ~11 jours

# Le calcul d'erreur pour l'évaluation des $C_{ij}$

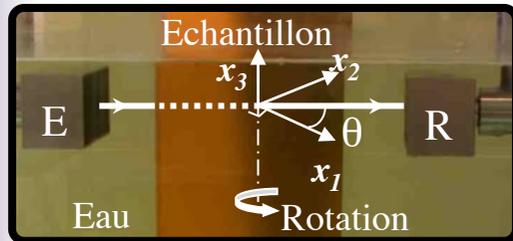
Mesure du champ acoustique transmis pour plusieurs angles d'incidence

$$A_k^{Exp}$$

Valeurs initiales pour l'optimisation des  $C_{ij}$

Fonction des  $C_{ij}$  permettant de calculer le champ transmis (obtenue grâce au pb. direct)

$$\mathcal{A}(C)$$



Algorithme d'optimisation

$$\mathcal{F}(C) = \sum_{k=1}^m \left( A_k^{Exp} - \mathcal{A}(C) \Big|_k \right)^2$$

Meilleure estimation des modules de viscoélasticité avec une certaine erreur

$$C = \left( C_i + \Delta C_i \right)_{i=1, \dots, n}$$

?

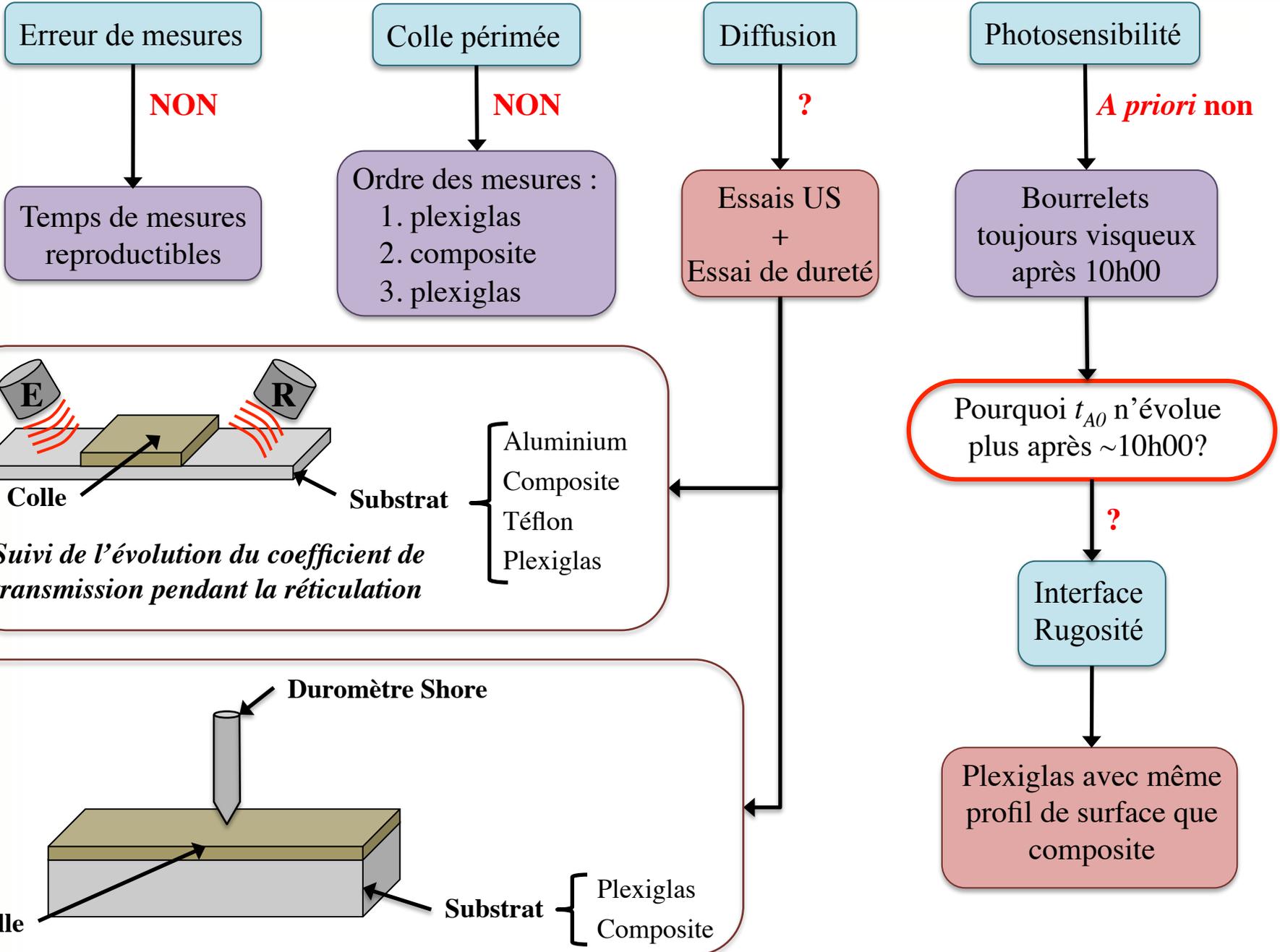
$$r_i = \frac{\Delta C_i}{C_i}$$

Différence entre les valeurs mesurées et calculées  $\rightarrow e_k = A_k^{Exp} - \mathcal{A}(C) \Big|_k$

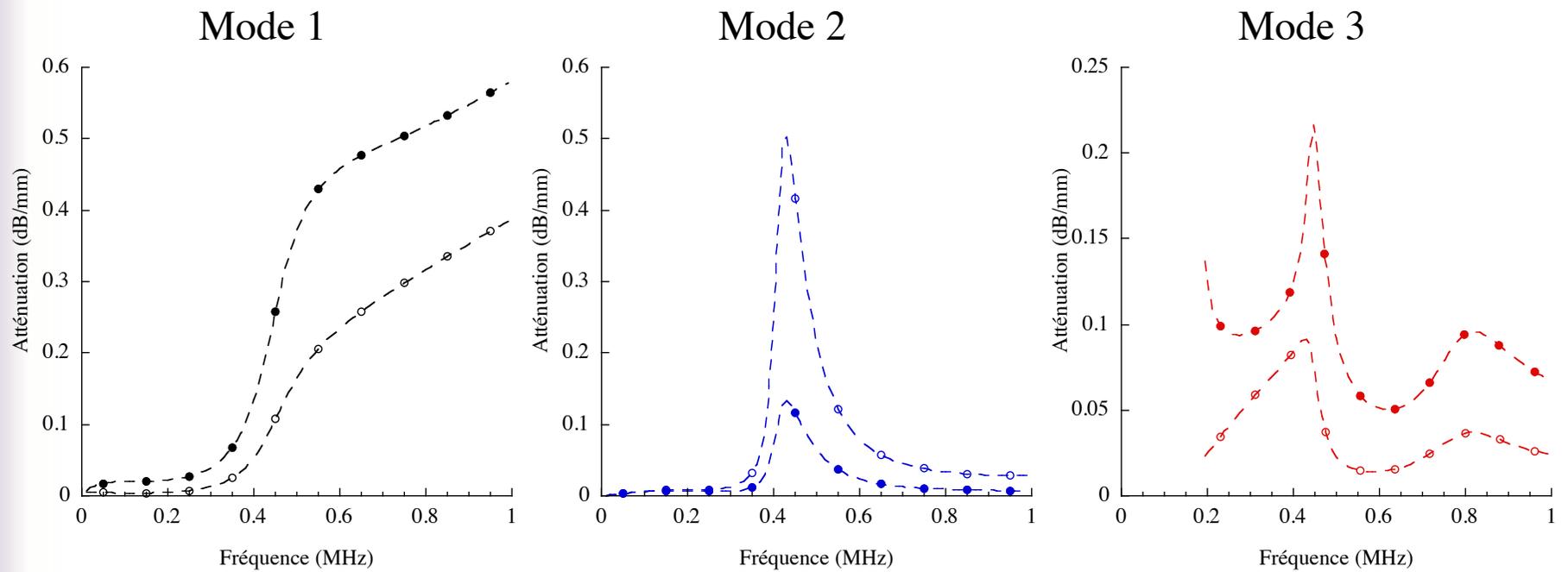
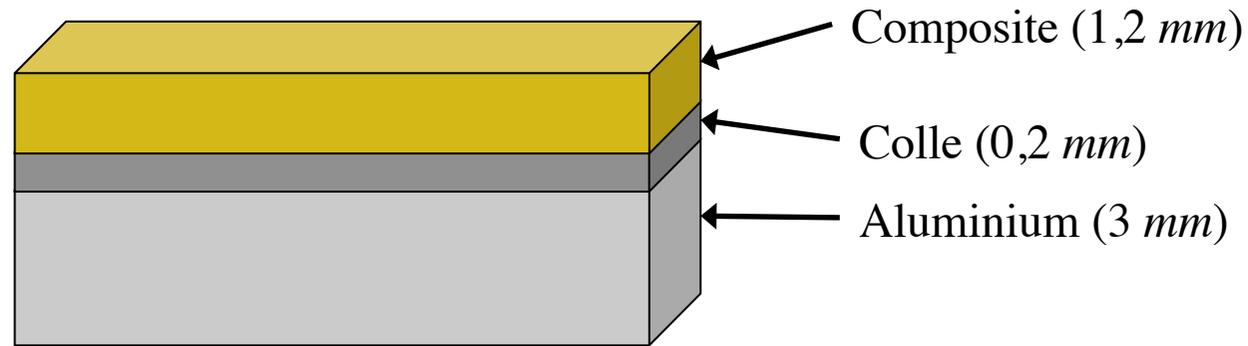
Matrice d'insensibilité de la fonction  $\mathcal{A}$  au paramètre  $C_i$   $\rightarrow \mathbf{I} = \mathbf{S}^{-1}$  où  $\vec{S}_i = \left[ C_i \frac{\partial \mathcal{A}(C_i)}{\partial C_i} \Big|_k \right]$

Finalement  $\rightarrow \mathbf{r} = \mathbf{Ie}$  et  $\max_{i=1}^n (r_i) \leq \sum_{k=1}^m |I_{ik} e_k|$

# Le ralentissement de la réticulation



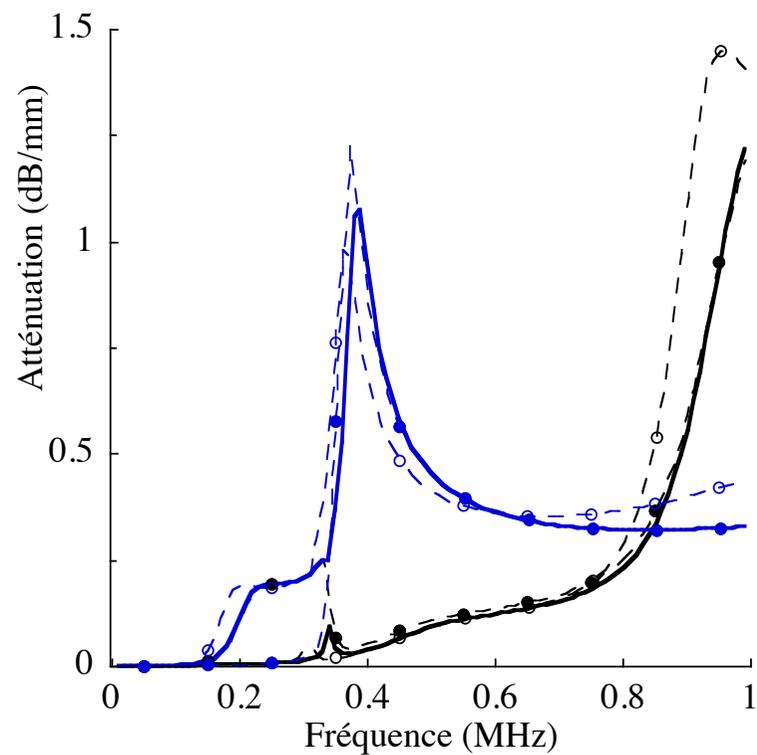
# Les effets de la viscosité sur le calcul du coefficient de transmission



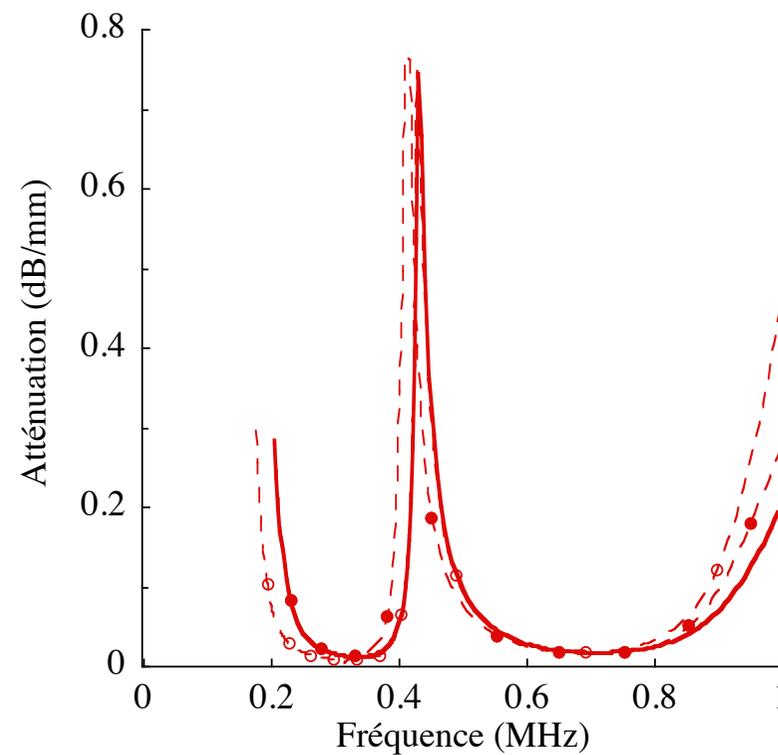
- Assemblage aux propriétés nominales
- Assemblage avec colle élastique

# Etude de la sensibilité des ondes de Lamb aux propriétés d'un collage

## Mode 1 et 2



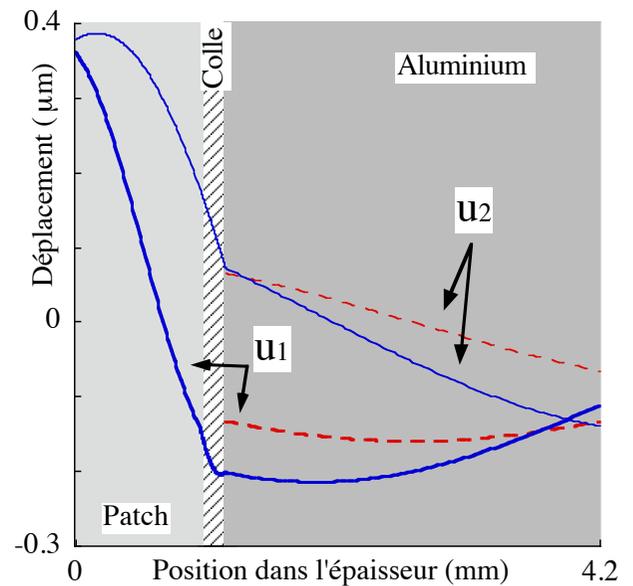
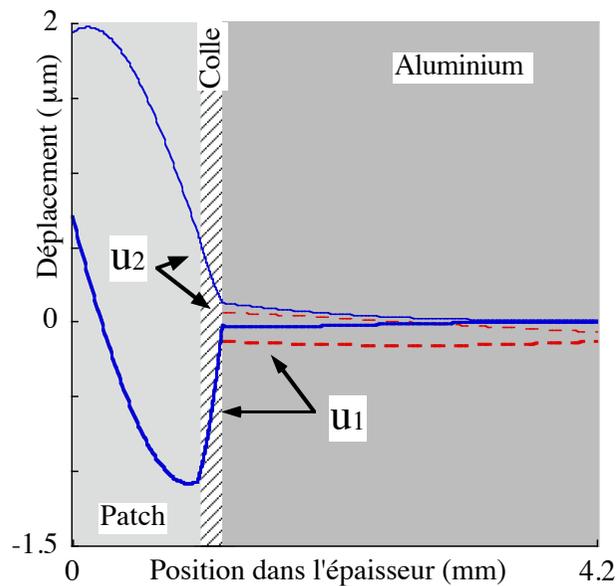
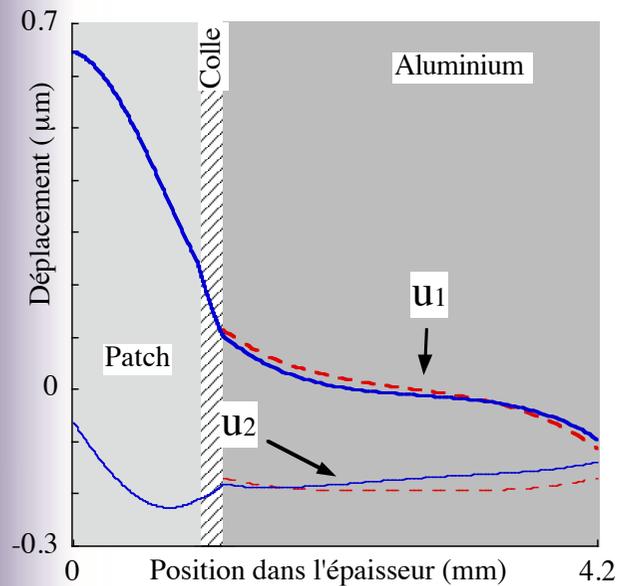
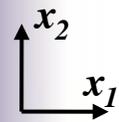
## Mode 3



--●--  $C_{11}$  -40%

--○--  $C_{66}$  -40%

## Choix du mode incident à 400 kHz



Mêmes conclusions que pour un patch en composite

- Mode A<sub>0</sub> incident depuis l'aluminium → Mode 1 de l'assemblage
- Mode S<sub>0</sub> incident depuis l'aluminium → Modes 2 et 3 de l'assemblage