

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...)



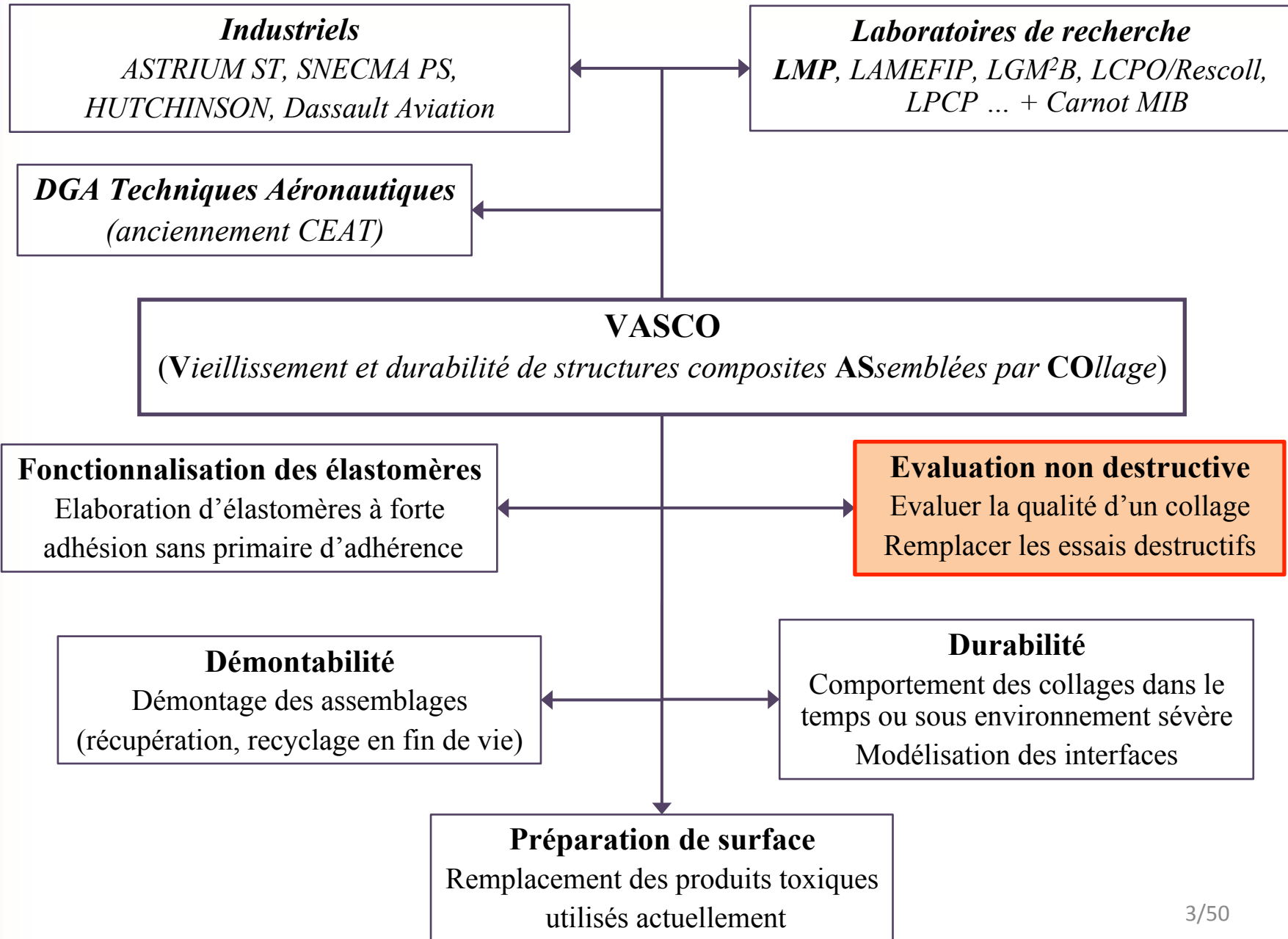
Alternative aux réparations classiques

→ la réparation par collage de patch composite



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

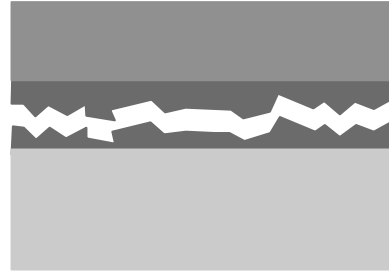
Contexte de l'étude



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

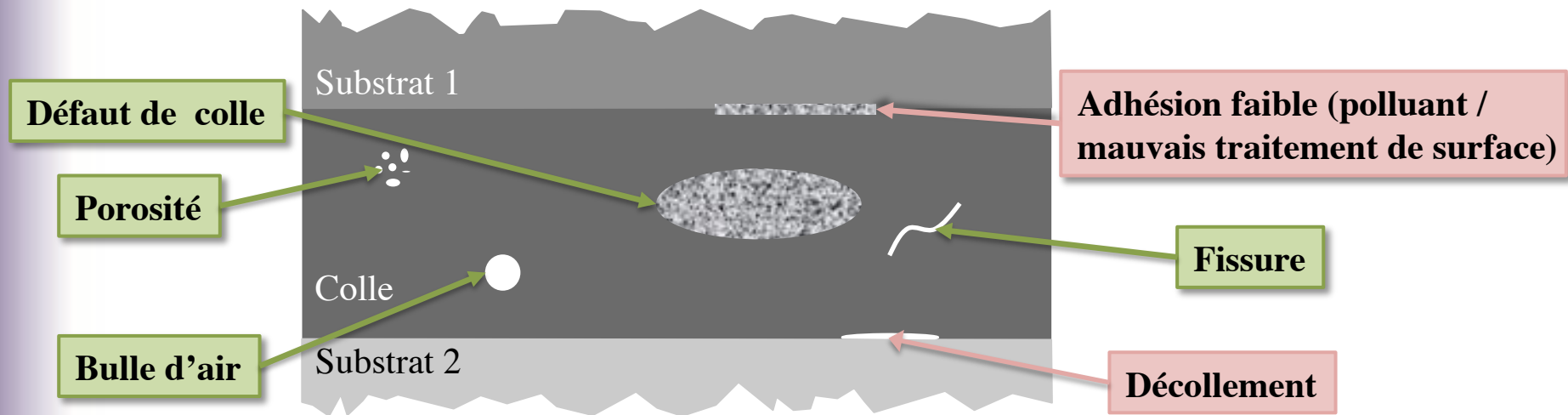
Rupture **cohésive**

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



Rupture **adhésive**

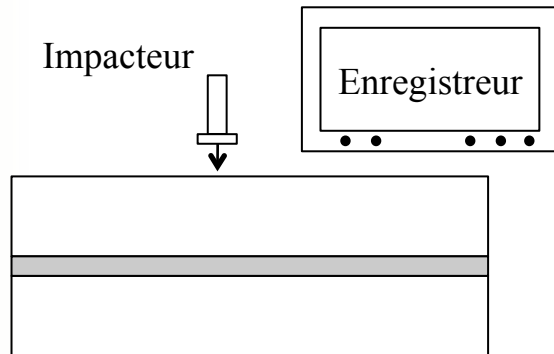
- ✓ Décollement
- ✓ Contaminant
- ✓ Mauvais traitement de surface



Techniques de détection des défauts

Les vibrations soniques

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

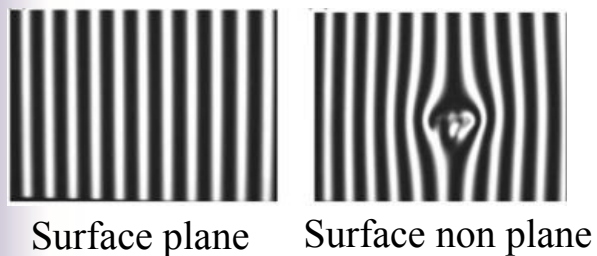


- ⊕ Détection de défaut cohésif et de décollement
- ⊖ Localisation difficile des défauts
- ⊖ Géométrie inconnue des défauts
- ⊖ Insensible à la qualité d'interface

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



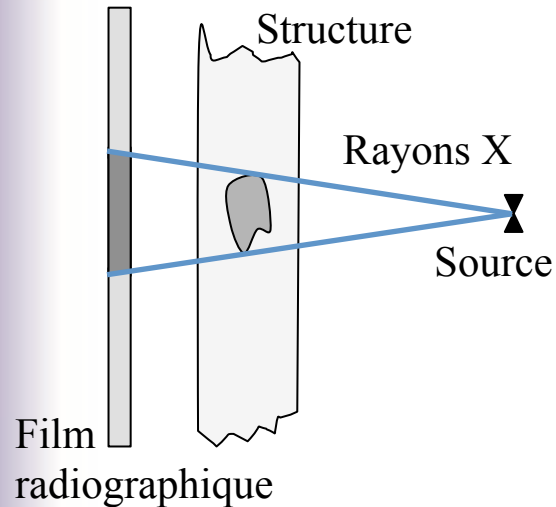
- ⊕ Détection de défaut cohésif et de décollement
- ⊕ Sans contact
- ⊖ Pas de localisation dans l'épaisseur
- ⊖ Valable pour des matériaux aux propriétés optiques adaptées

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

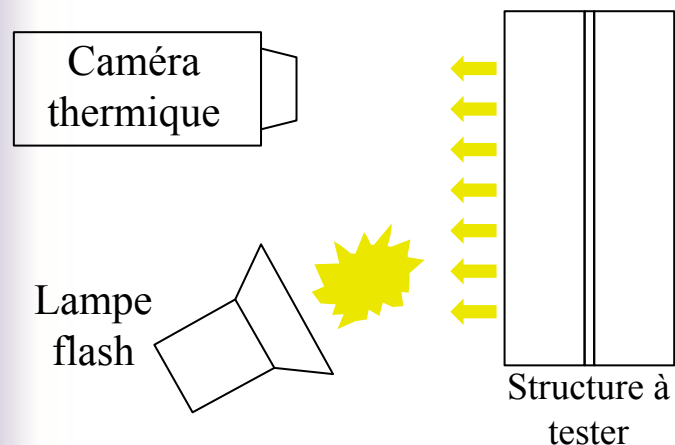


- + Détection de très petits défauts cohésifs et de décollements
- + Sans contact
- + Inspection globale de tout type de structure
- Méthode coûteuse (matériel, local sécurisé)
- Rayonnement dangereux pour la santé

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

Les techniques thermiques

Chauffage de la structure et mesure du champ de température



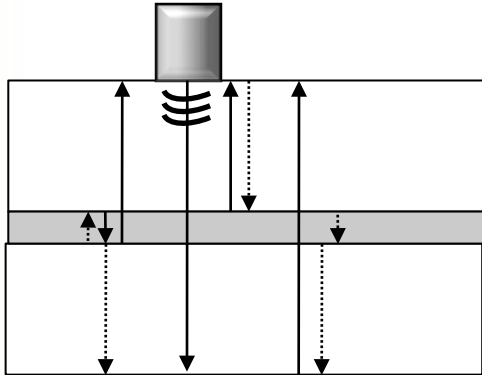
- + Détection de défaut cohésif et de décollement
- + Accès uni latéral et sans contact
- + Inspection globale et rapide de la structure
- Localisation difficile des défauts
- Identification difficile des défauts

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



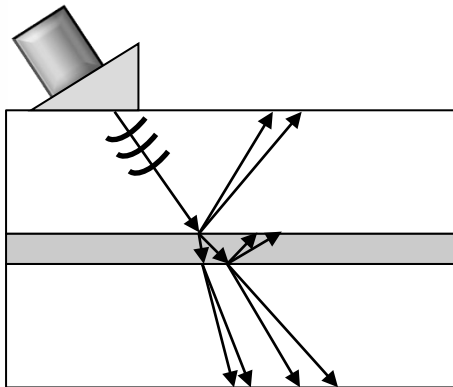
- ⊕ Détection de tout défaut de type cohésif
- ⊕ Evaluation de la géométrie du défaut
- ⊕ Accès uni latéral possible
- ⊖ Insensible aux défauts adhésifs
- ⊖ Difficultés pour analyser les signaux car nombreux échos
- ⊖ Nécessité d'un produit de couplage

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

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

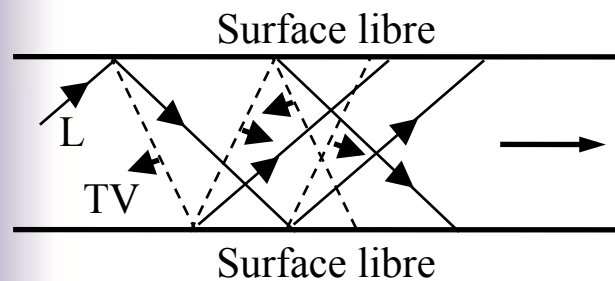
En incidence oblique

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

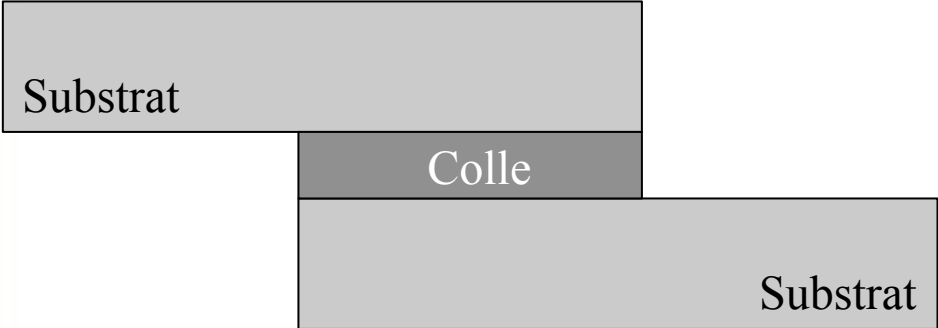
Evaluation non destructive d'un collage par ondes guidées



- ⊕ 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
Santos et al., <i>J. Adhes 84, 2008</i>	Alu./Colle/Alu.	Lap joint	Détection de trous
Dufflo et al., <i>Compos. Struct. 79, 2007</i>	Compos./Colle/Compos.	Tricouche	Idem + dimensionnement
Heller et al., <i>NDT&E Int. 33, 2000</i>	Alu./Colle/Alu.	Tricouche	Sensibilité au vieillissement chimique
Lowe et al., <i>J. Acoust. Soc. Am. 107, 2000</i>	Alu./Colle/Alu.	Lap joint	Dimensionnement de la zone de recouvrement
Castaigns et al., <i>Ultrasonics 42, 2004</i>	Compos./Colle/Béton	Tricouche	Corrélation essai US / traction uni axiale
Lanz di Scalea et al., <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
Koreck et al., <i>J. Nondestruct. Eval. 26, 2007</i>	Alu./Colle	Bicouche	Résolution d'un pb. inverse

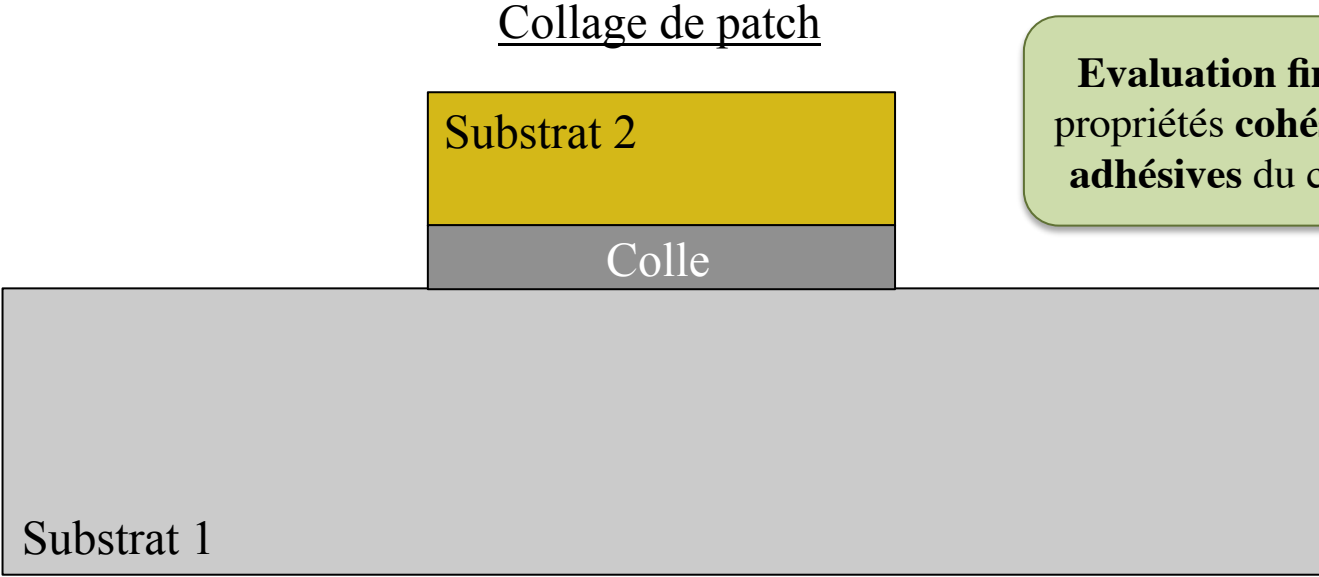
Evaluation non destructive d'un collage de patch par ondes guidées



Lap joint

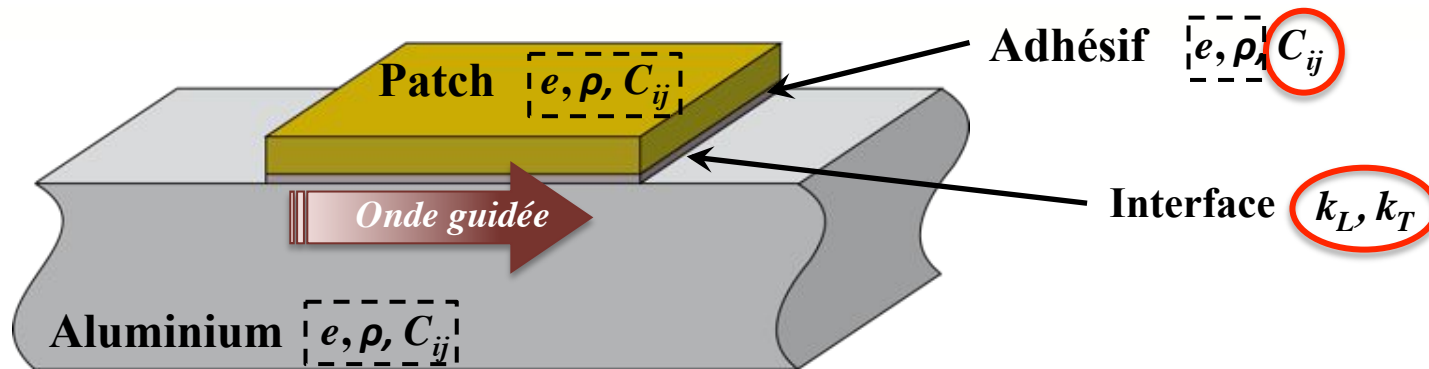


Tricouche



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*

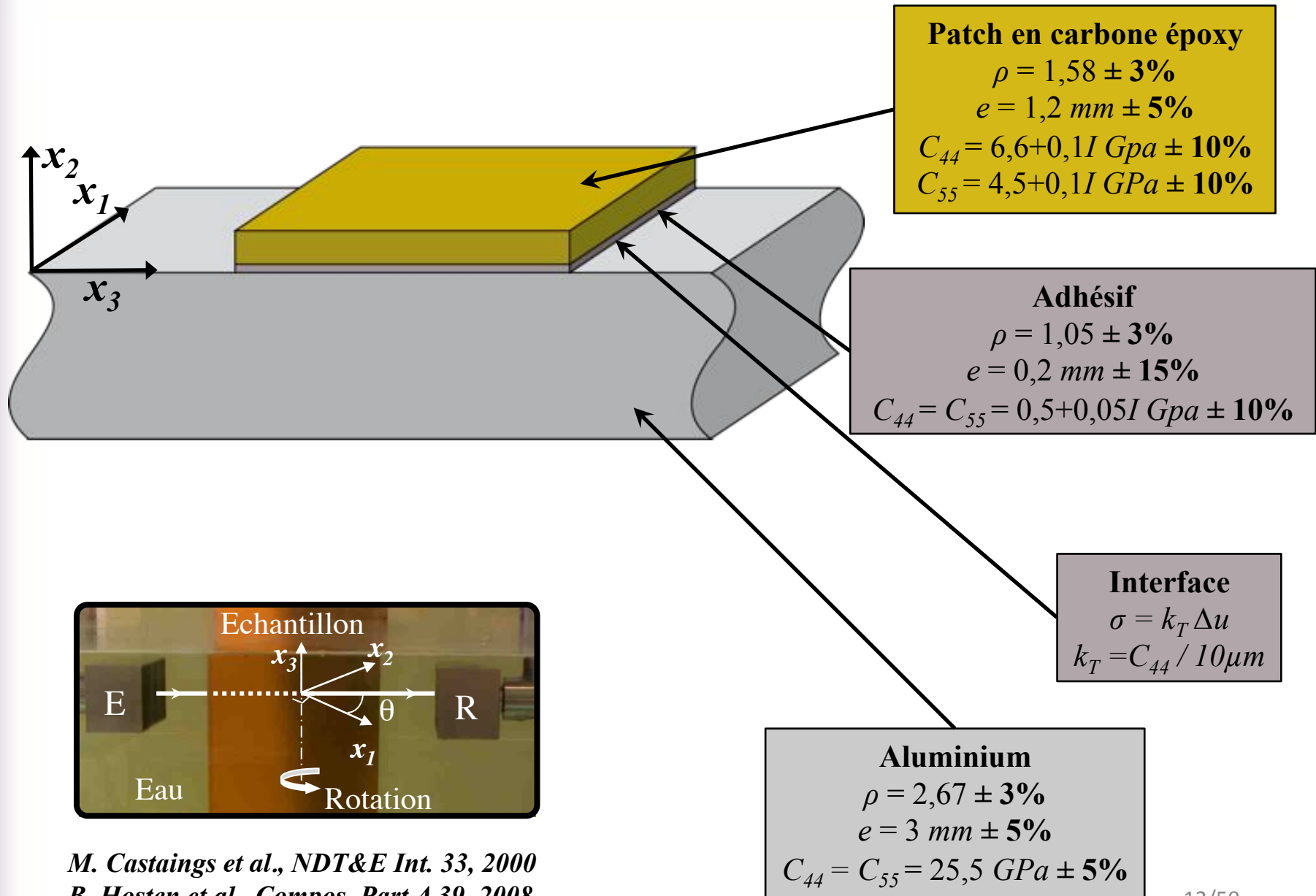
III. Les ondes de Lamb pour tester le collage

- ✓ *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

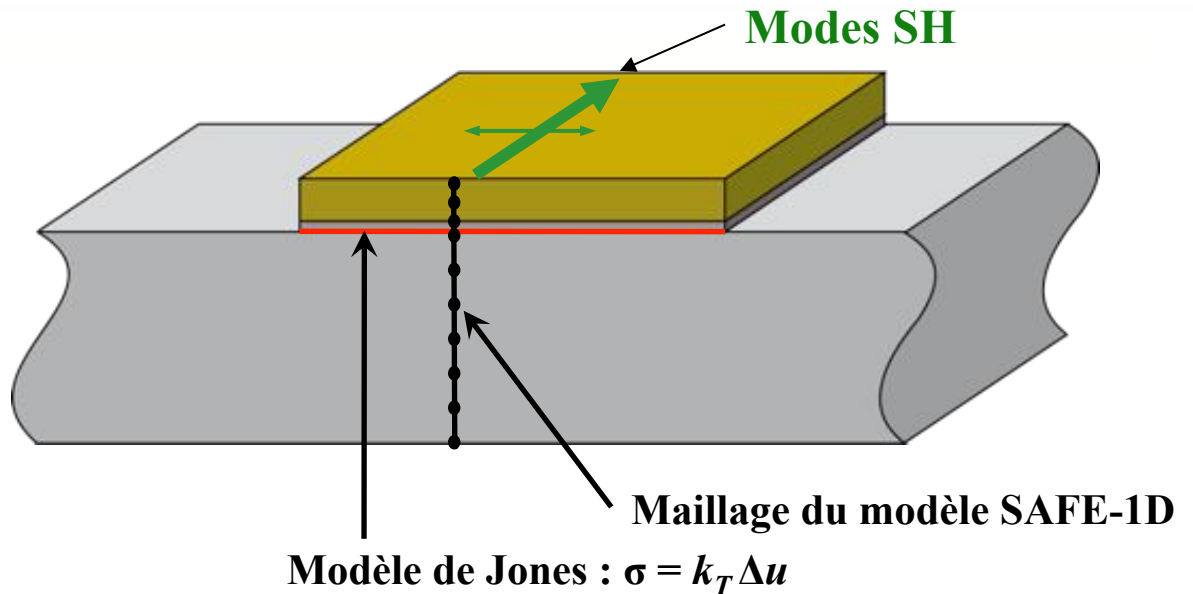
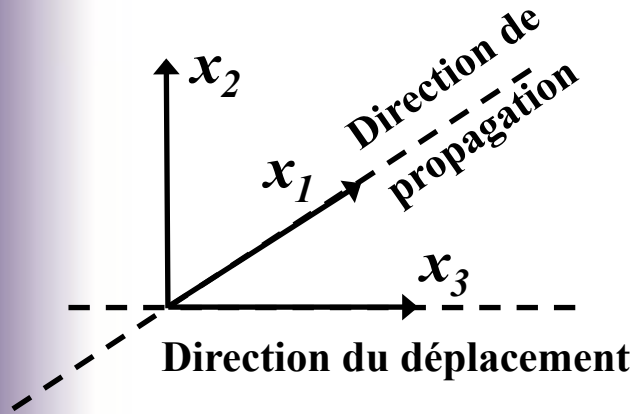
V. Conclusions et perspectives

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



On considère un déplacement de la forme :

$$U(x_1, x_2, x_3, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_3(x_2)e^{I(\omega t - kx_1)} \end{pmatrix}, \quad I^2 = -1$$

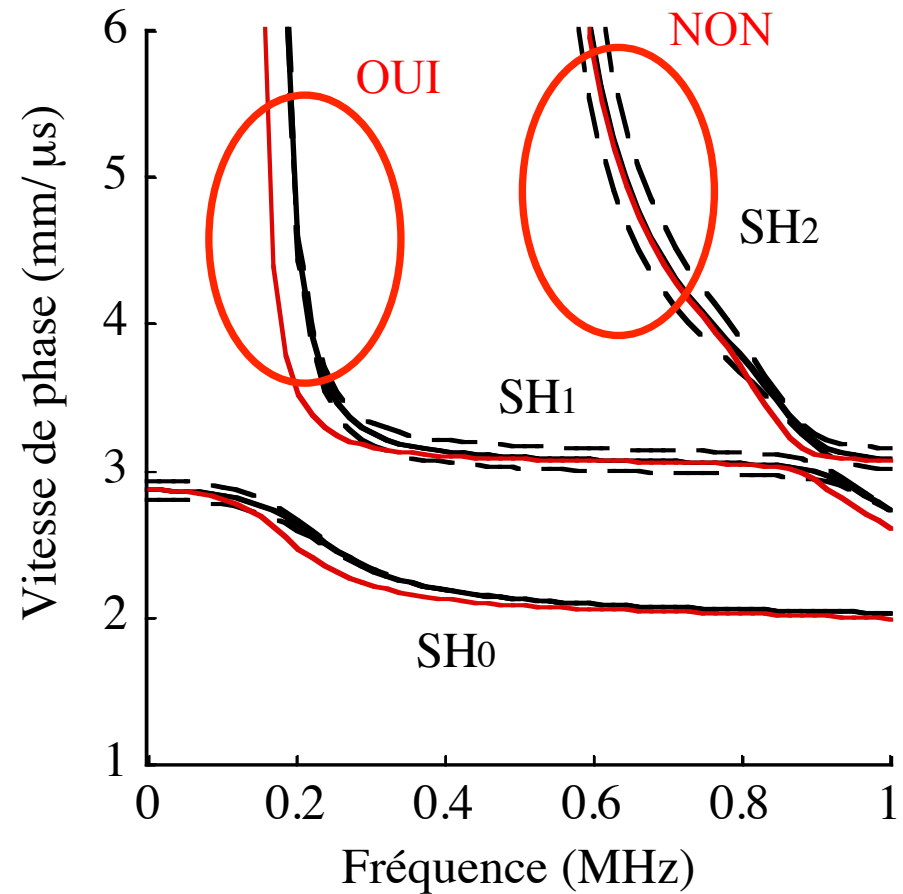
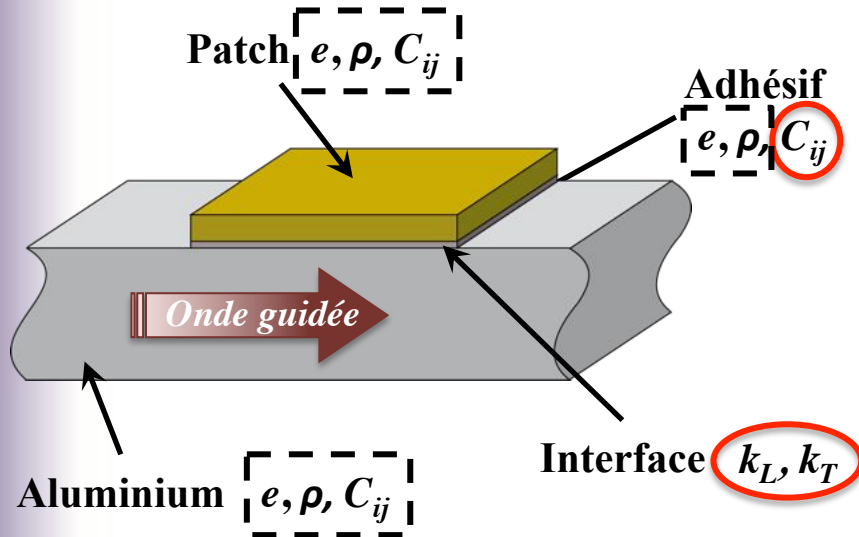
Le problème aux valeurs propres dans le domaine s'écrit :

$$C_{44} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} - k^2 C_{55} u_3 + \rho \omega^2 u_3 = 0$$

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

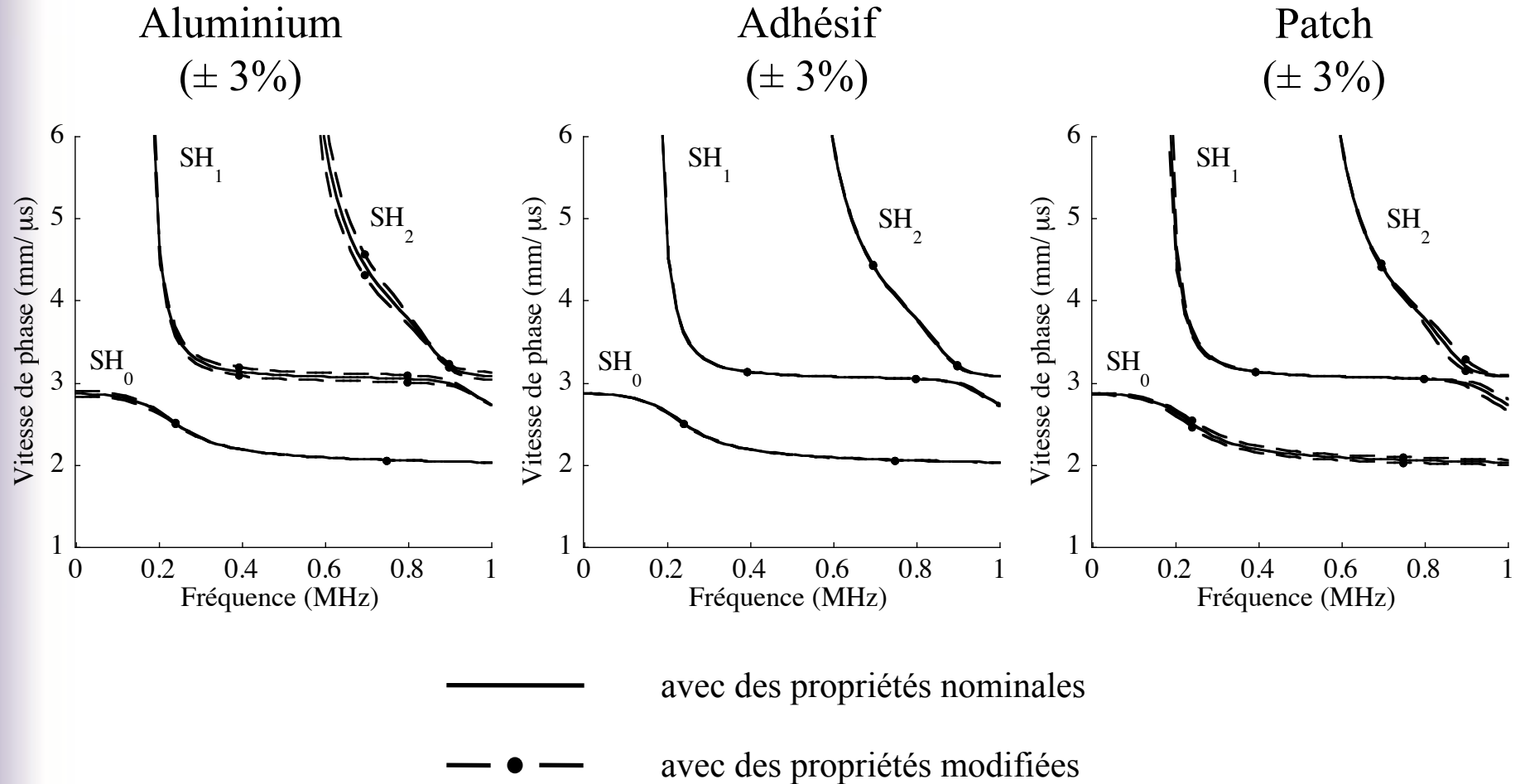


— avec des propriétés nominales

- - - 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)

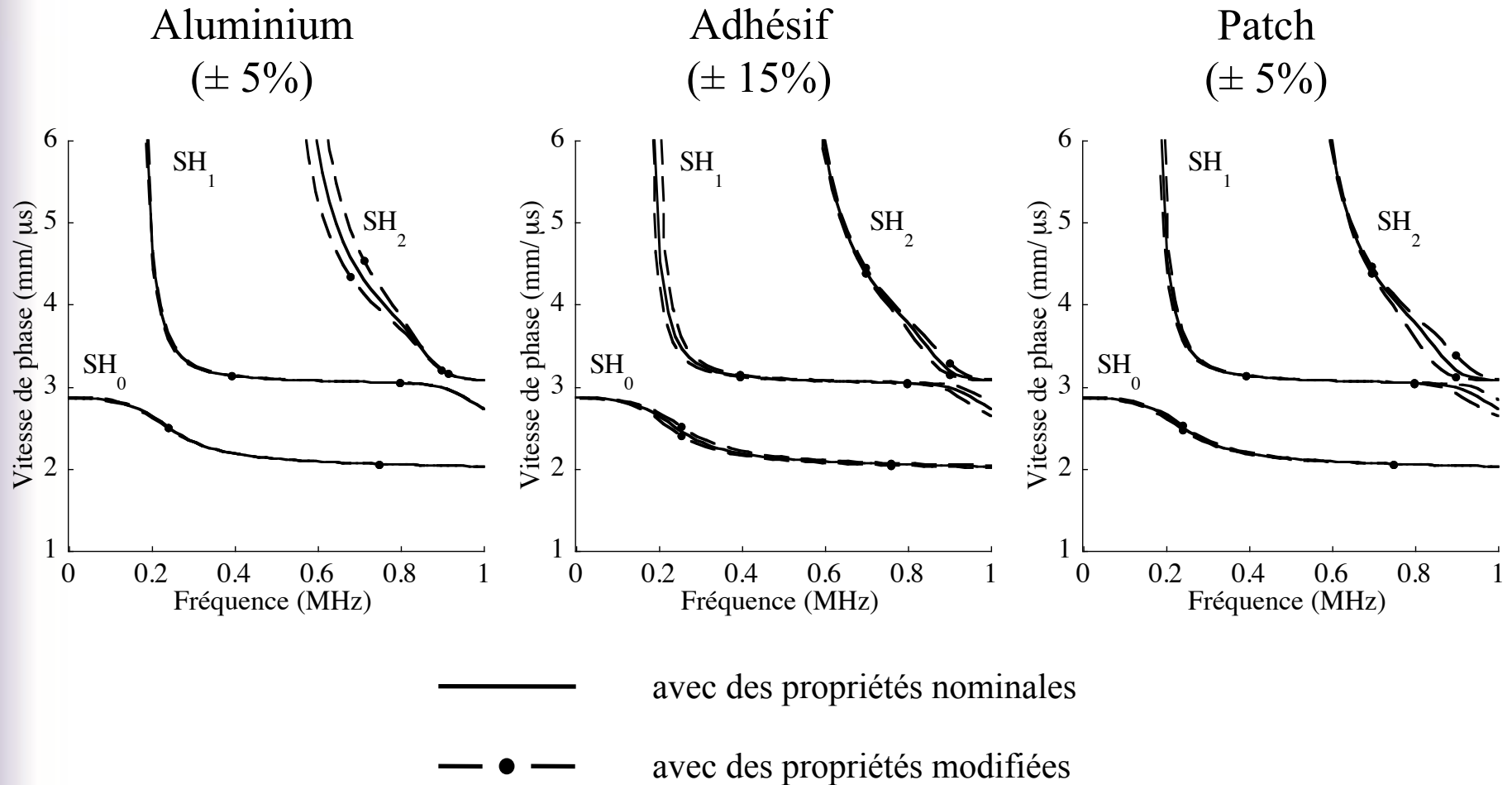
— avec des propriétés modifiées de l'adhésif ou de l'interface

Sensibilité des ondes SH aux densités



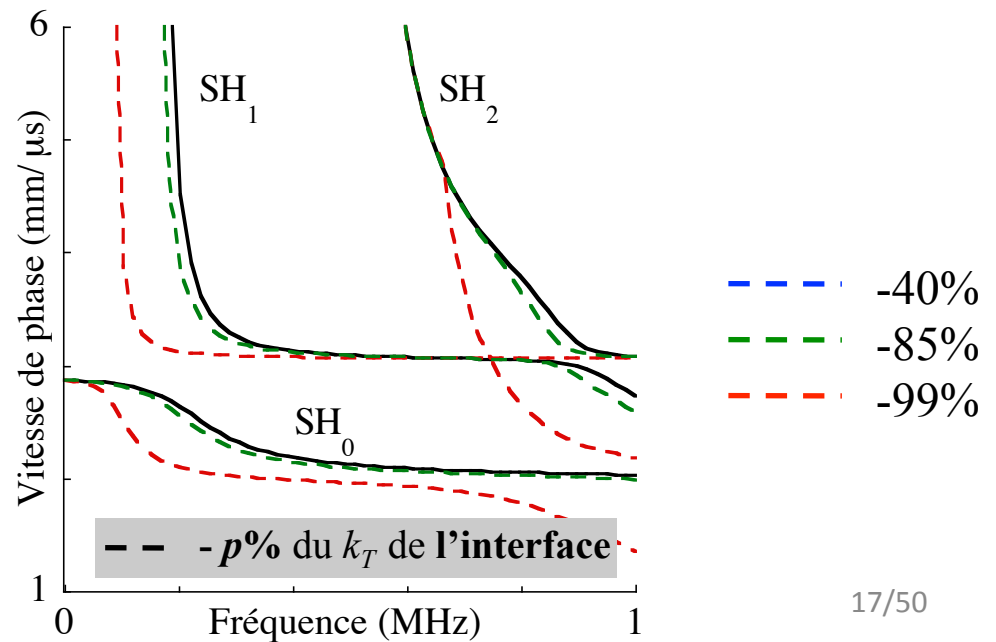
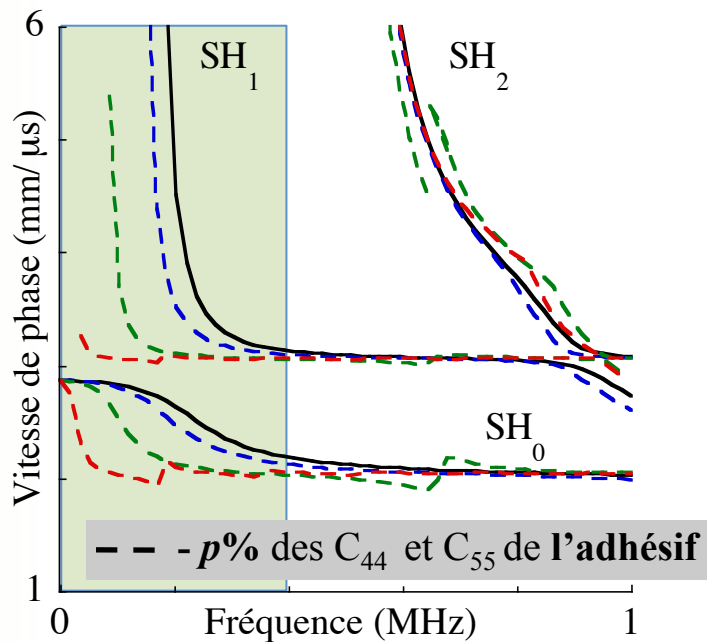
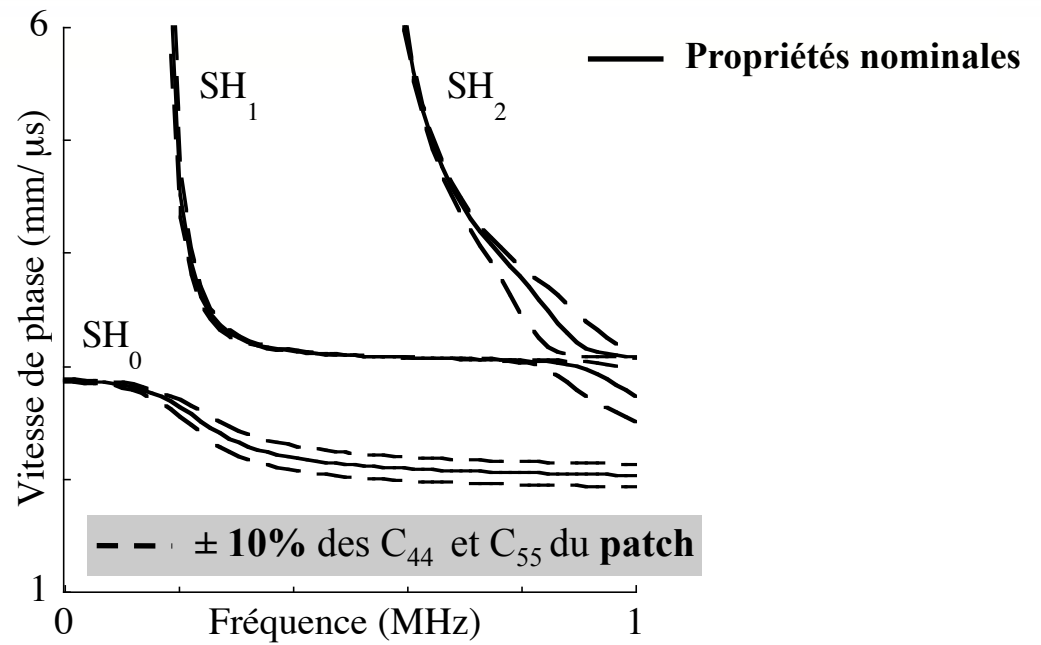
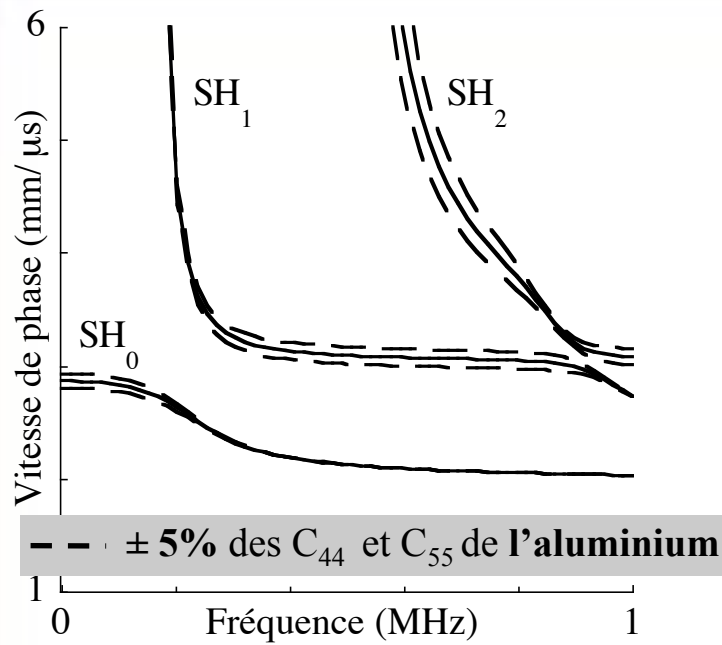
Le mode SH₂ est relativement sensible aux densités de l'aluminium ou du patch
Même conclusion pour le mode SH₁ au dessus de F_{SH1}^c
Les 3 modes sont très peu sensibles à la densité de l'adhésif

Sensibilité des ondes SH aux épaisseurs

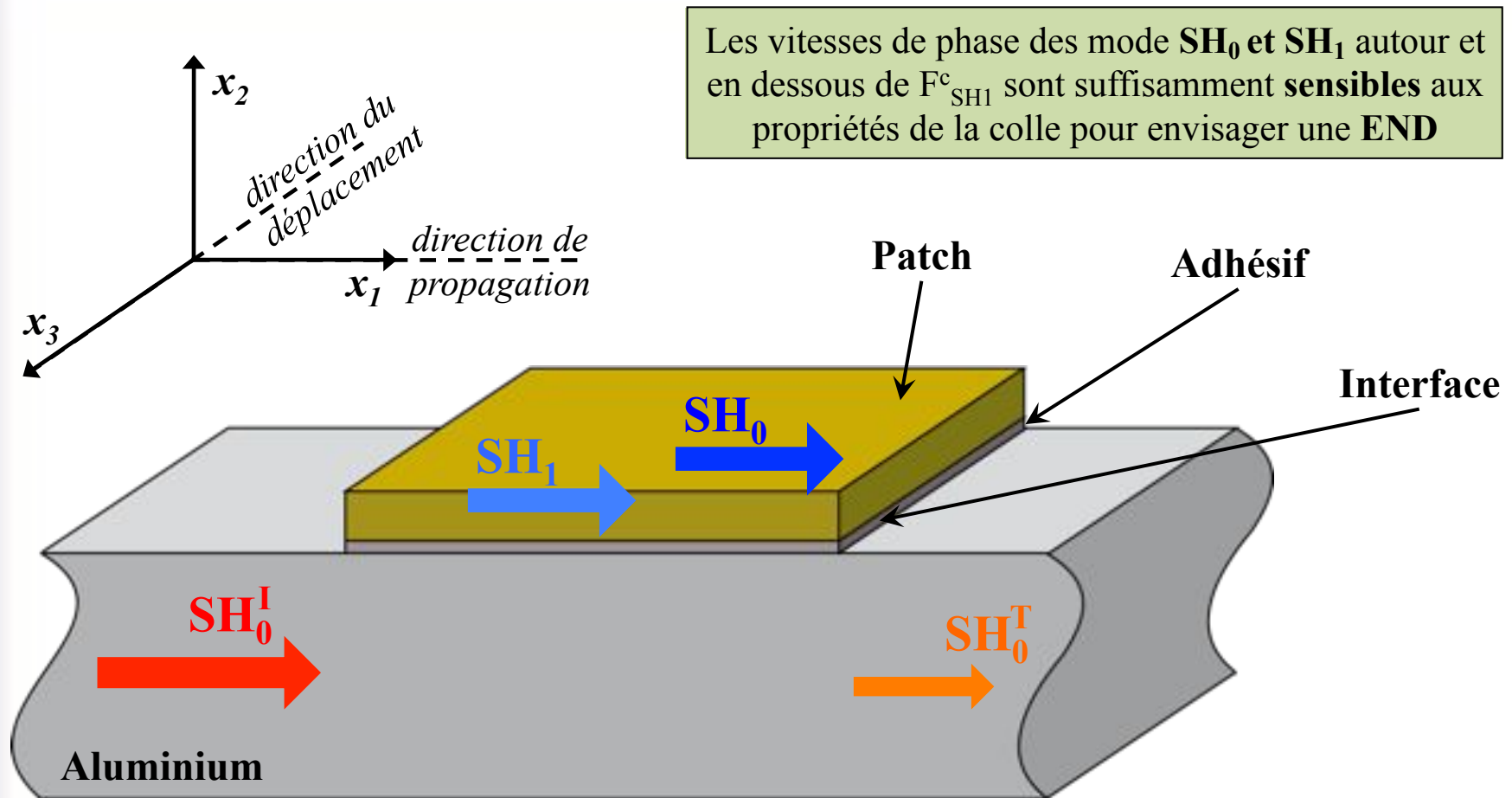


Le mode SH₂ est trop sensible aux épaisseurs des 3 matériaux
Le mode SH₁ est sensible à l'épaisseur de l'adhésif autour de F_{SH1}^c

Sensibilité des ondes SH aux propriétés en cisaillement

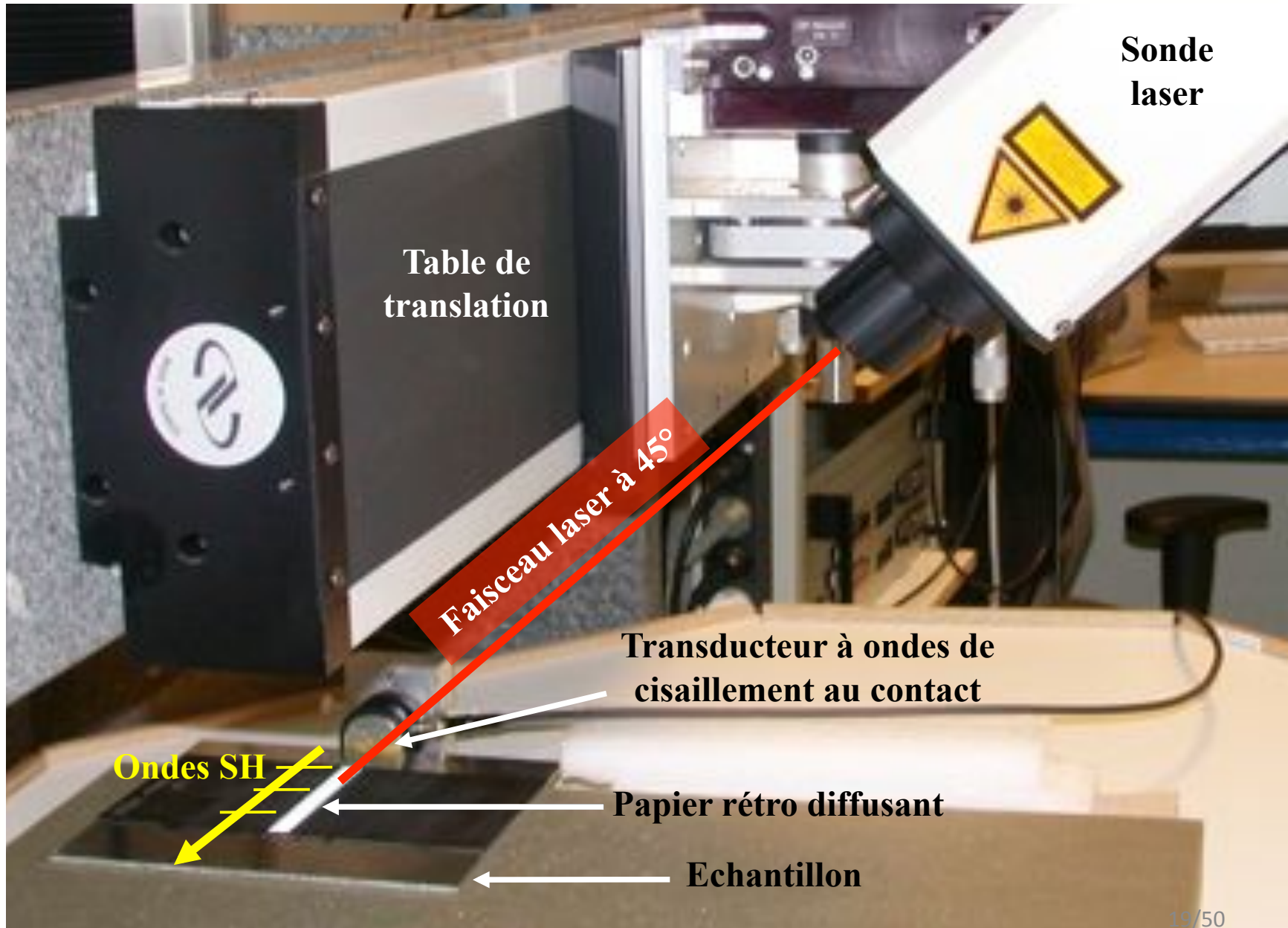


Exploitation de l'étude de sensibilité pour l'évaluation du G de la colle

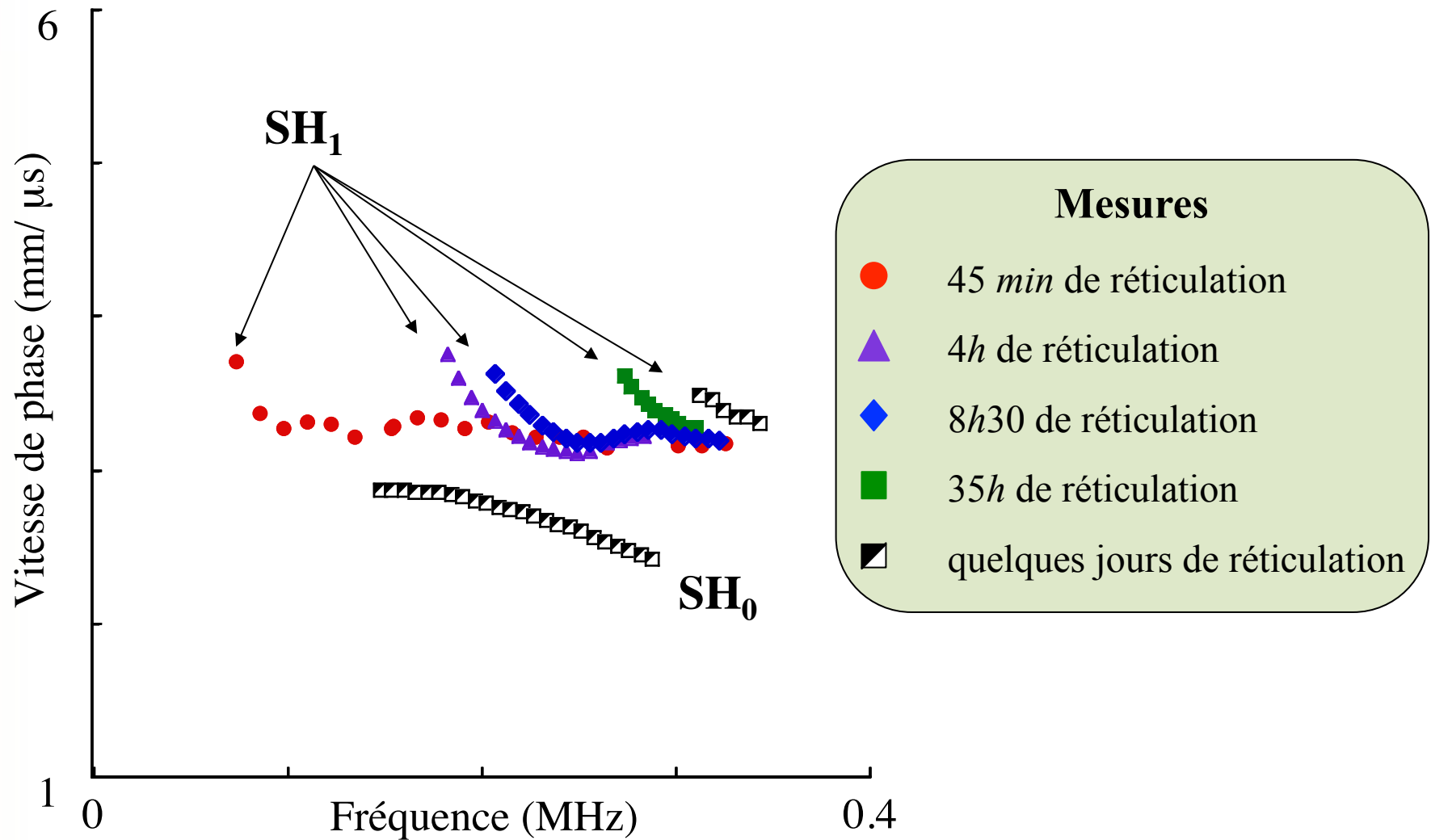


Objectif → Mesurer Vph des modes SH_0 et SH_1 pour $0 < f \leq F_{SH1}^c$
et utiliser ces mesures dans un problème inverse => module de *Coulomb* (G) de la colle

Dispositif expérimental



Résultat des mesures

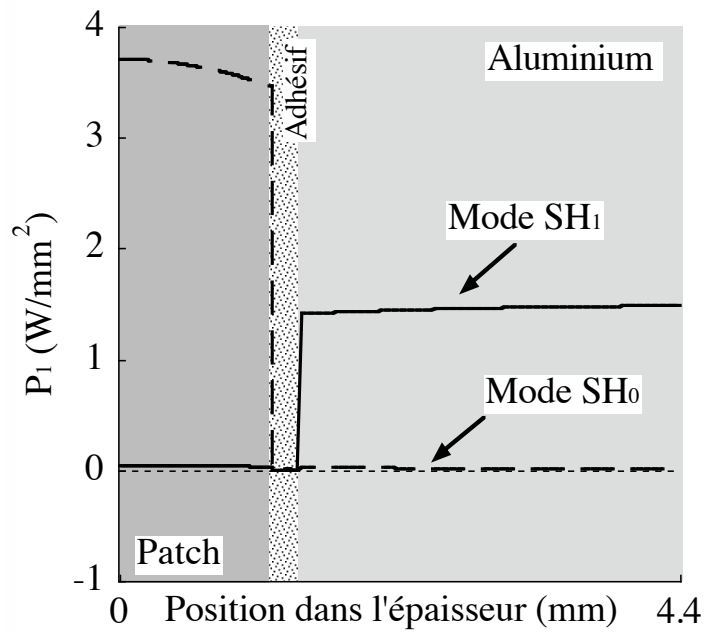
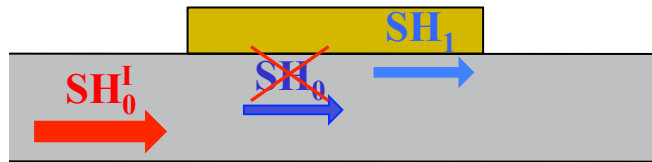


La couche de colle est épaisse de 0,1 mm

Comprendre les mesures

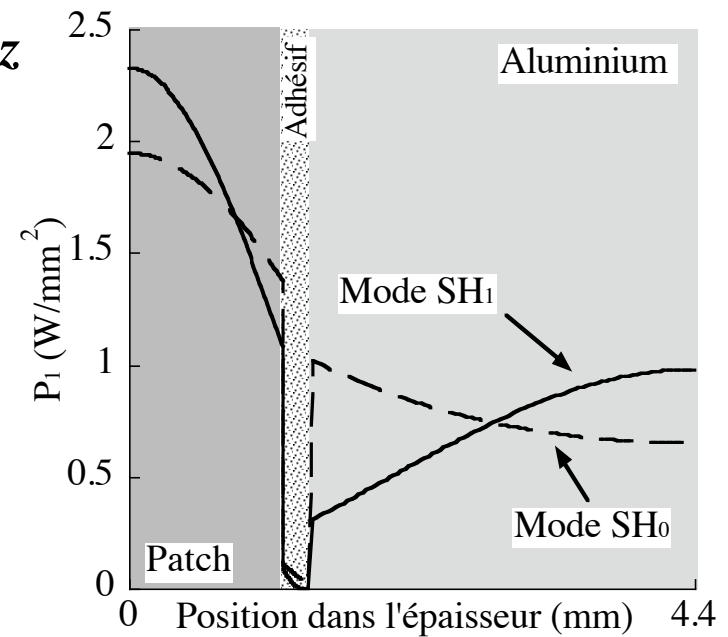
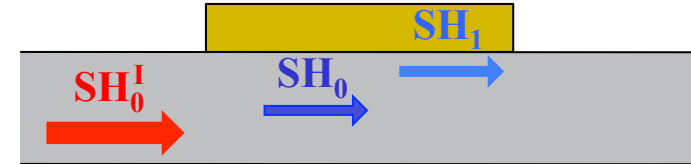
Pourquoi les modes SH_0 et SH_1 ne sont-ils pas toujours détectés tous les deux ?

Niveau faible de cohésion



à 200 kHz

Niveau fort de cohésion

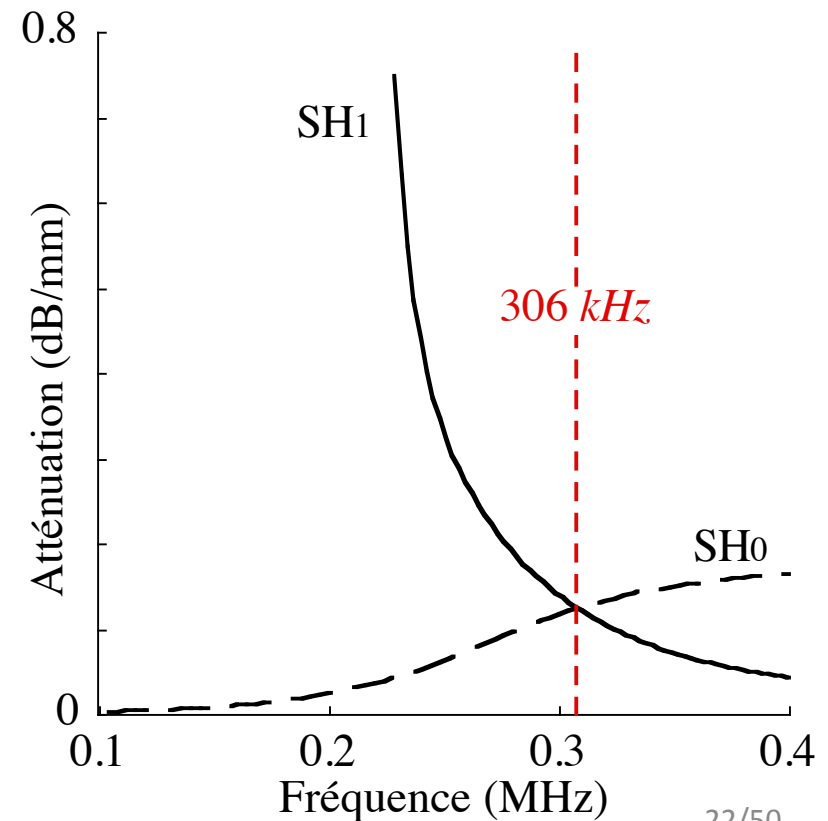
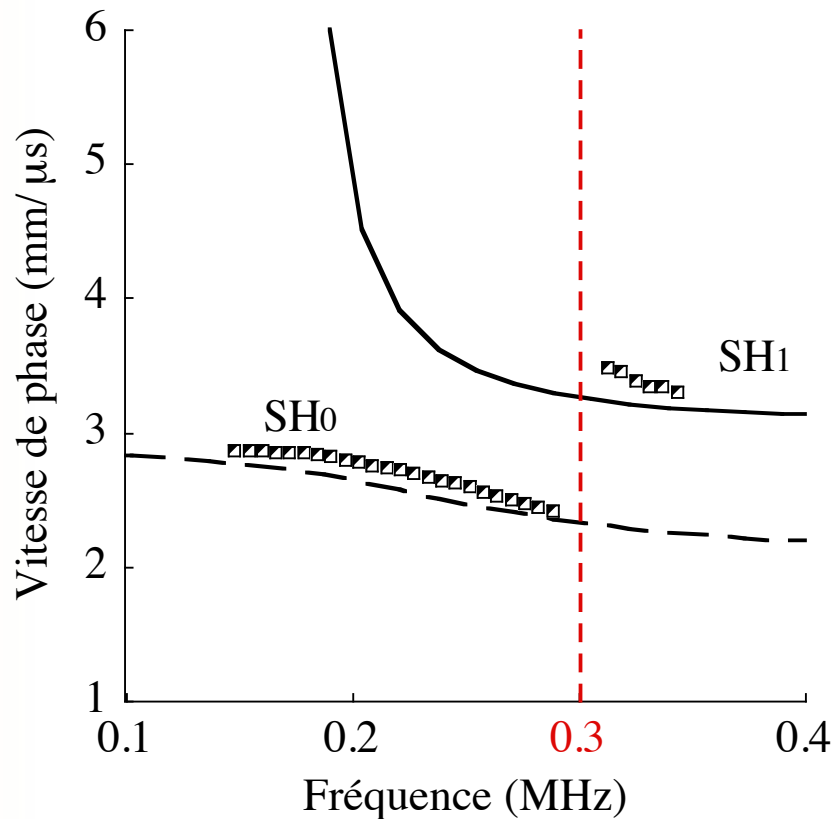
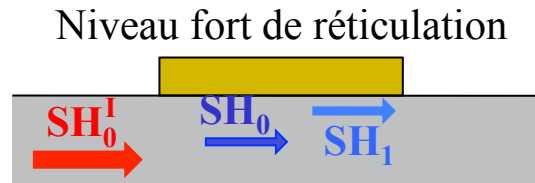


Le mode SH_0 de l'assemblage n'est pas couplé avec le mode SH_0 incident depuis l'aluminium

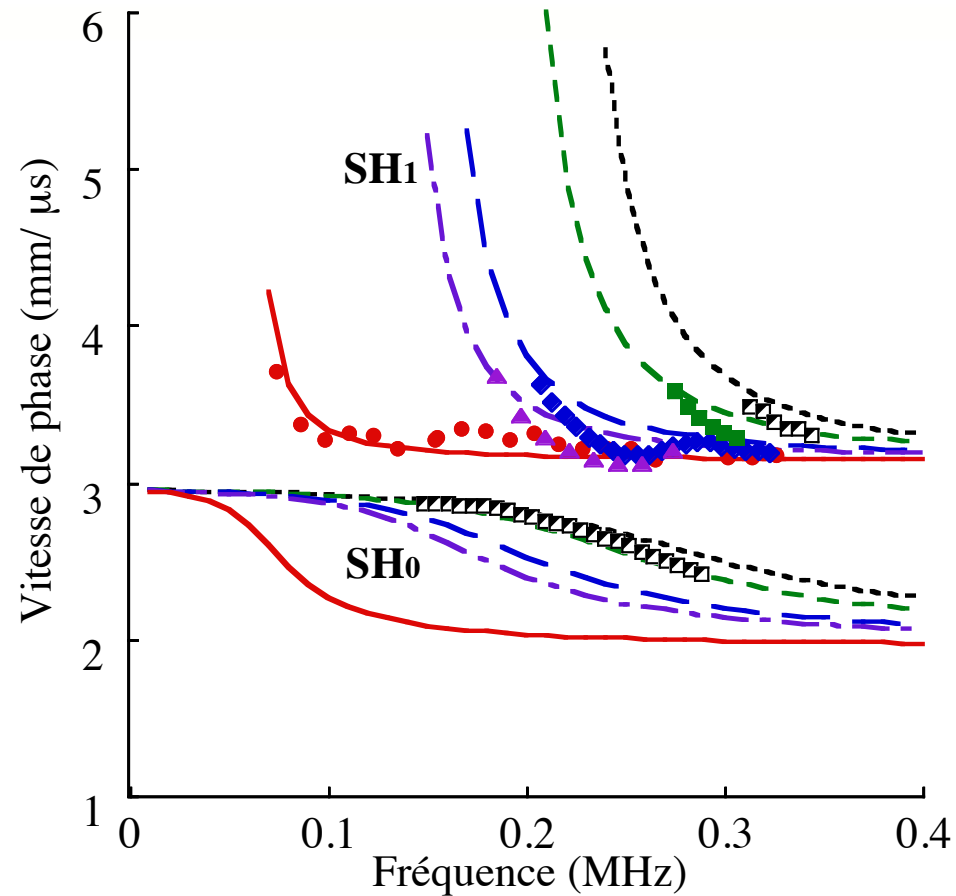
Les modes SH_1 et SH_0 de l'assemblage sont couplés avec le mode SH_0 incident depuis l'aluminium

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 ?

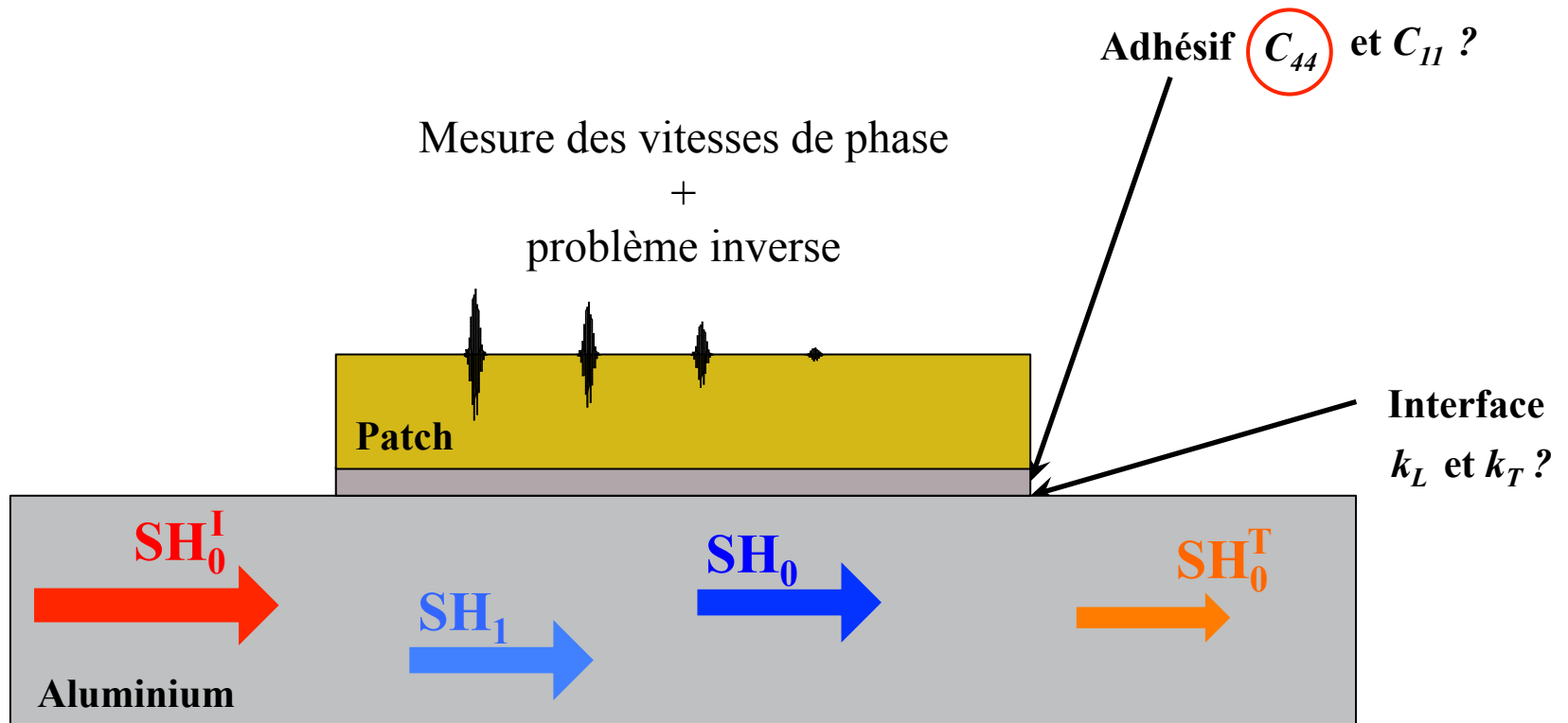


Le problème inverse



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*

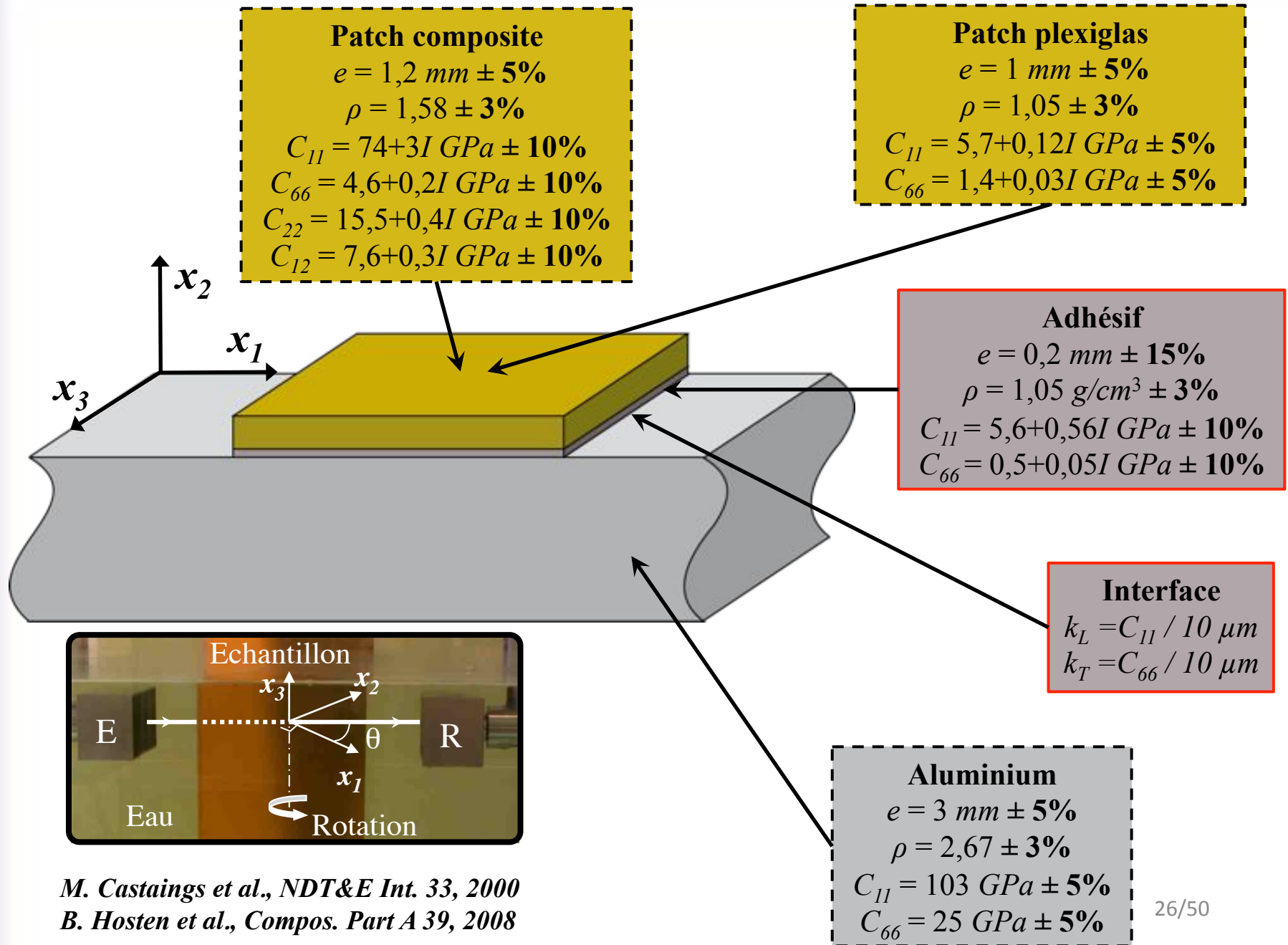
III. Les ondes de Lamb pour tester le collage

- ✓ *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

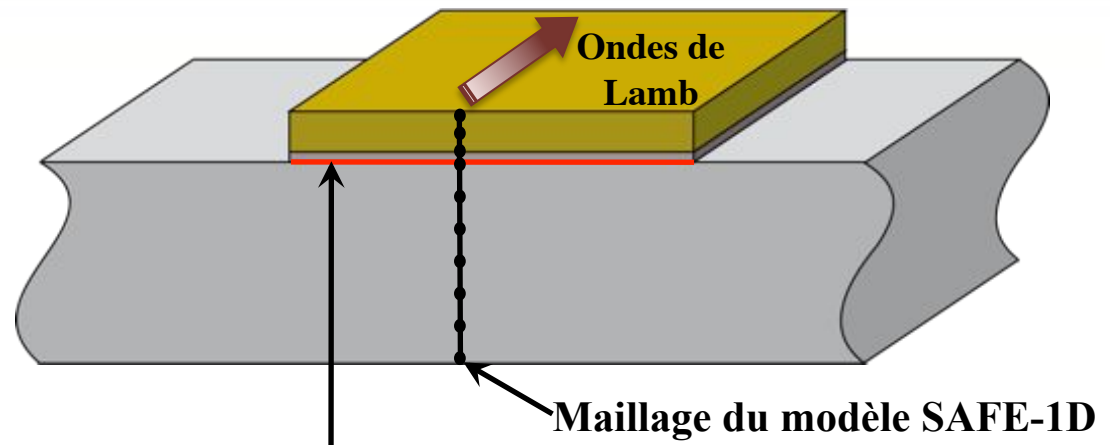
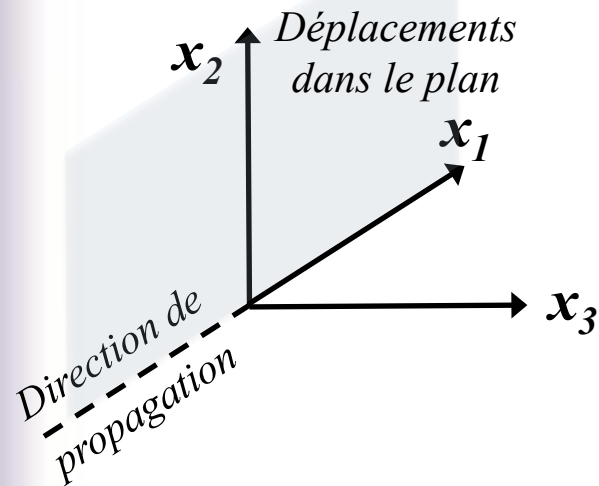
V. Conclusions et perspectives

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

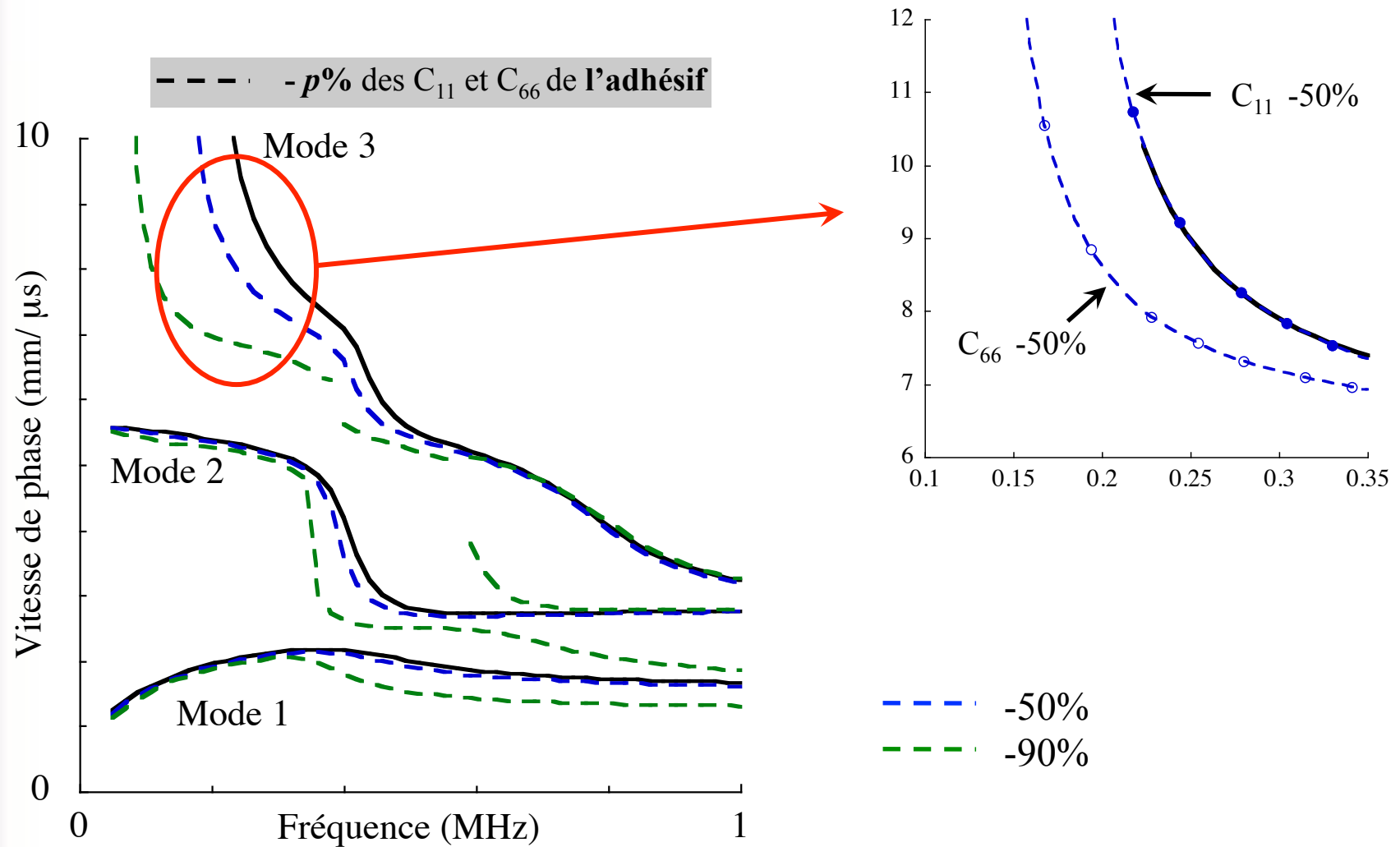
Dans ce cas le problème aux valeurs propres dans le domaine s'écrit :

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

et la condition aux frontières du domaine s'écrit :

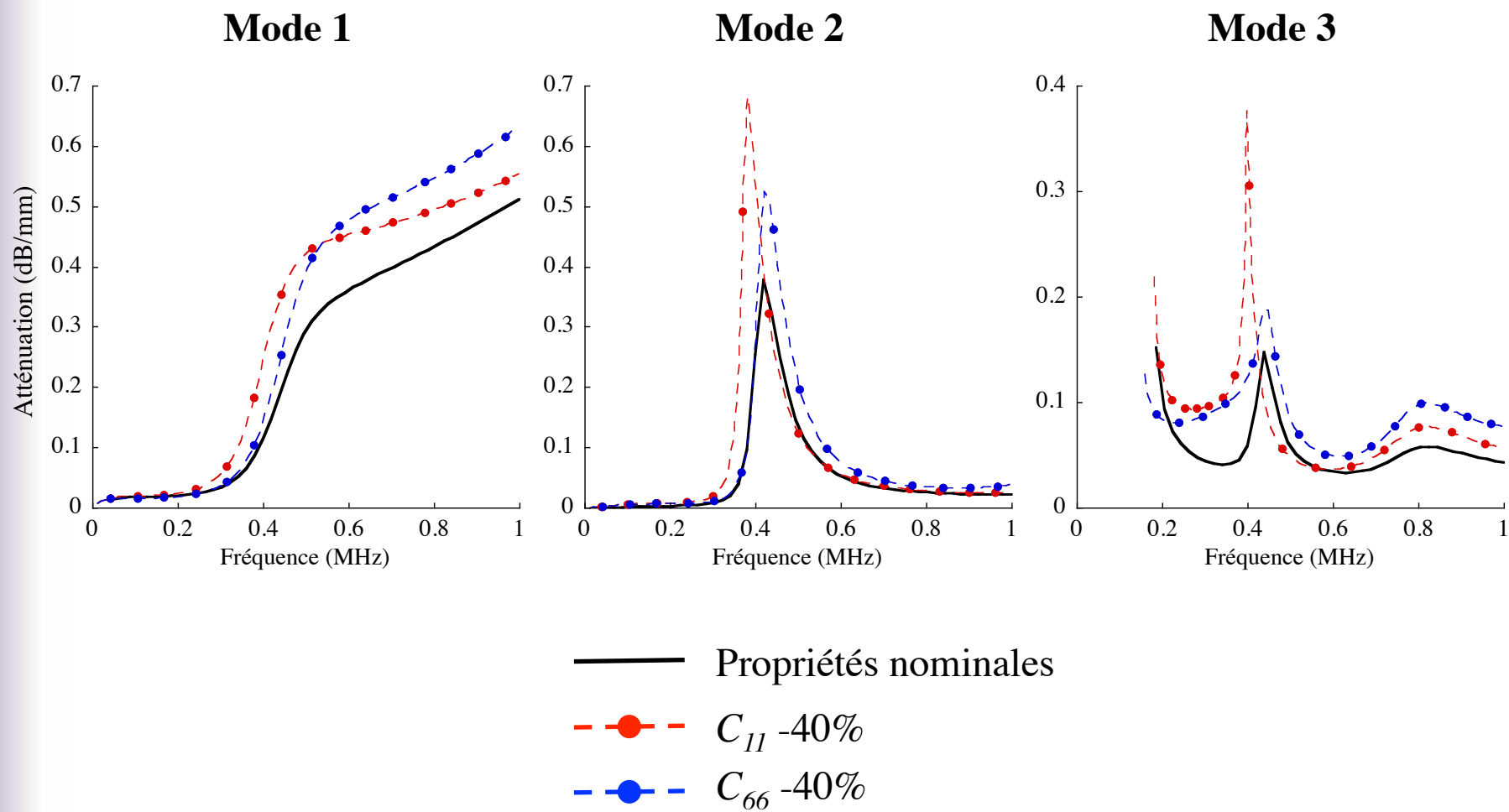
$$T_i = C_{i_2 j_2} \frac{\partial u_j}{\partial x_2} n_2 + IC_{2kj1} (ku_j) n_2 \quad \text{où } i=1, 2 \text{ et avec sommation sur } j=1, 2$$

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

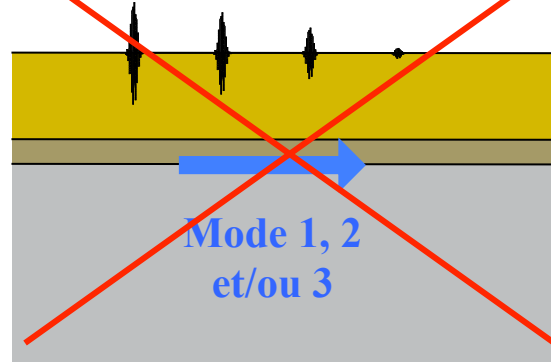
Les atténuations des Modes 1, 2 et 3 semblent
permettre une évaluation de propriétés de la colle
pour $f < 0,6 \text{ MHz}$

Sensibilité aux k_L et k_T de l'interface

Trop faible sensibilité

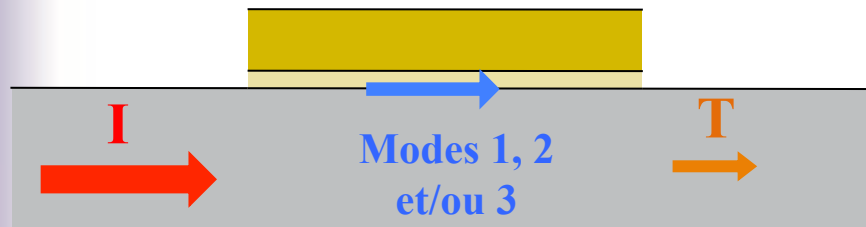
Comment exploiter cette sensibilité de l'atténuation ?

Mesure de la décroissance de l'amplitude



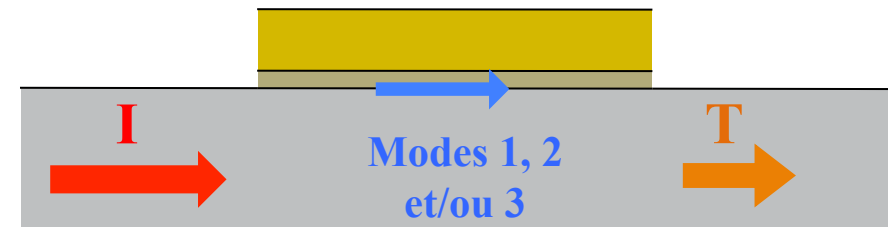
Etat 1 de la colle

=> Niveau 1 de l'atténuation de la colle



Etat 2 de la colle

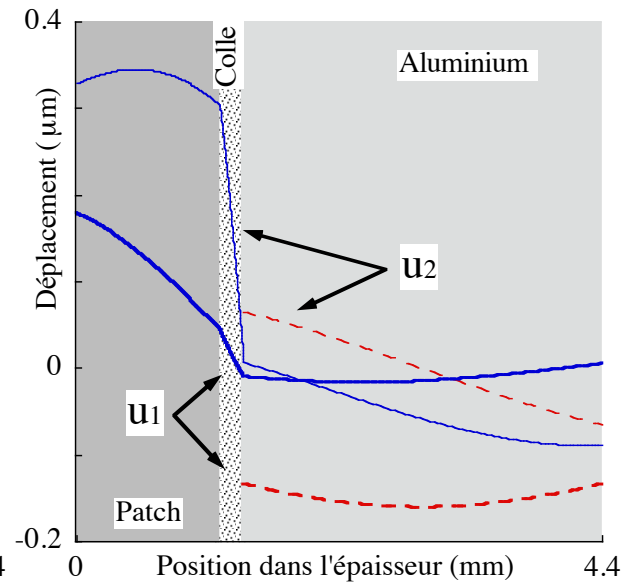
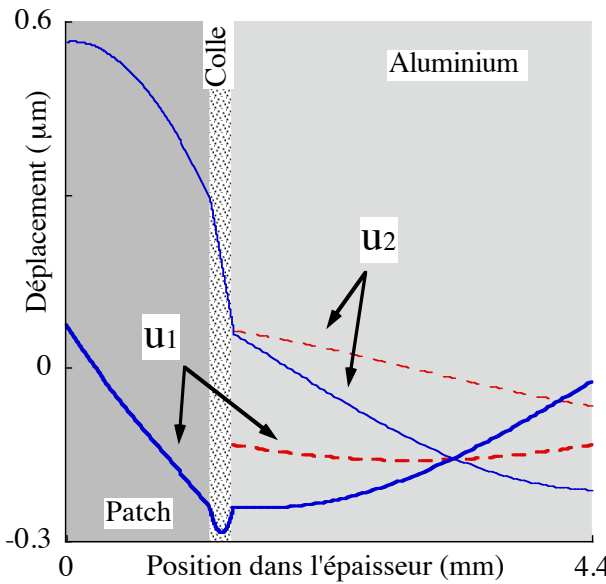
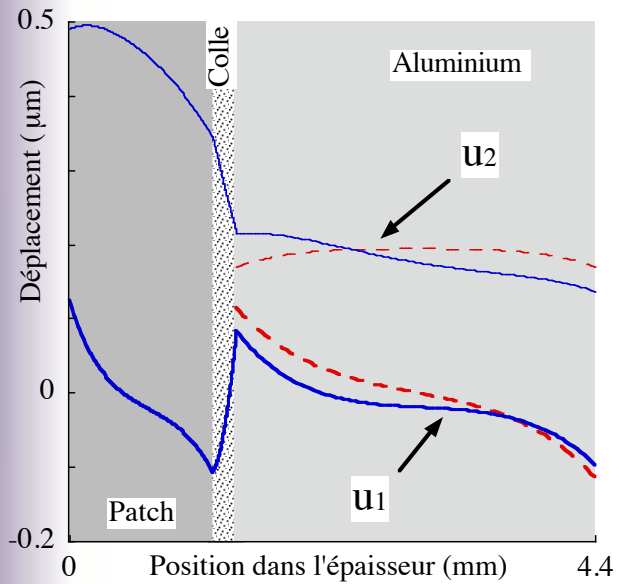
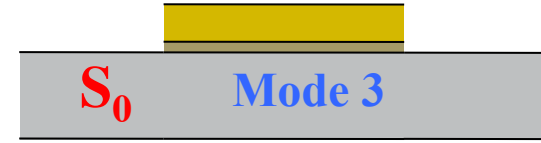
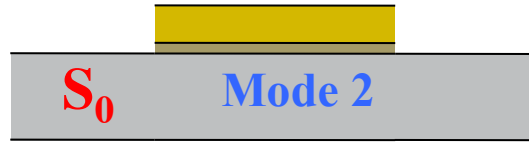
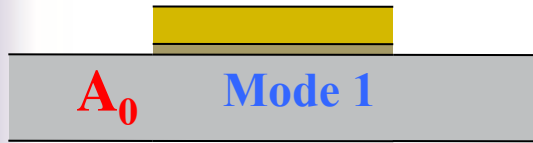
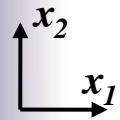
=> Niveau 2 de l'atténuation de la colle



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

Comment choisir le mode incident ?

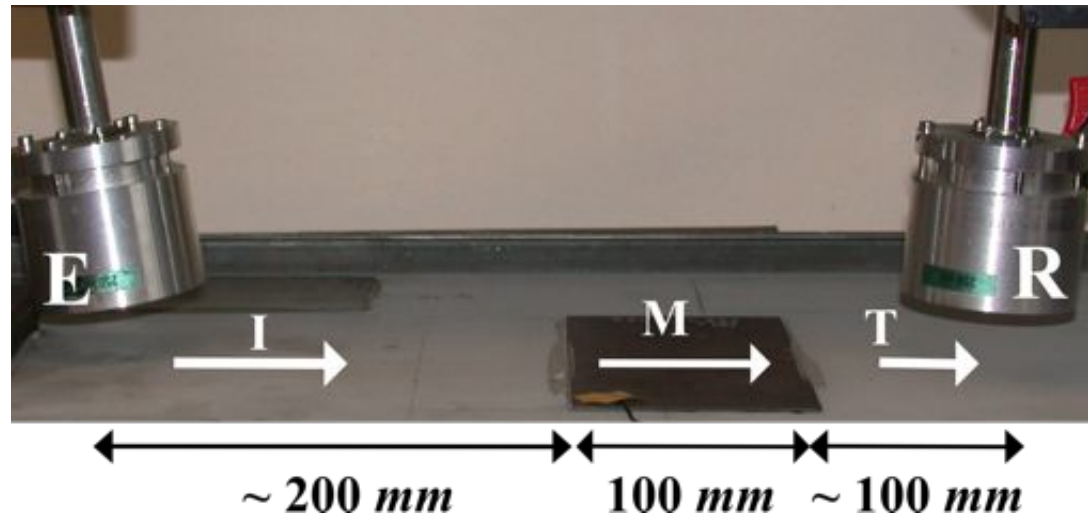
Choix du mode incident à 400 kHz



- Mode A_0 incident depuis l'aluminium → Mode 1 de l'assemblage
- Mode S_0 incident depuis l'aluminium → Modes 2 et 3 de l'assemblage

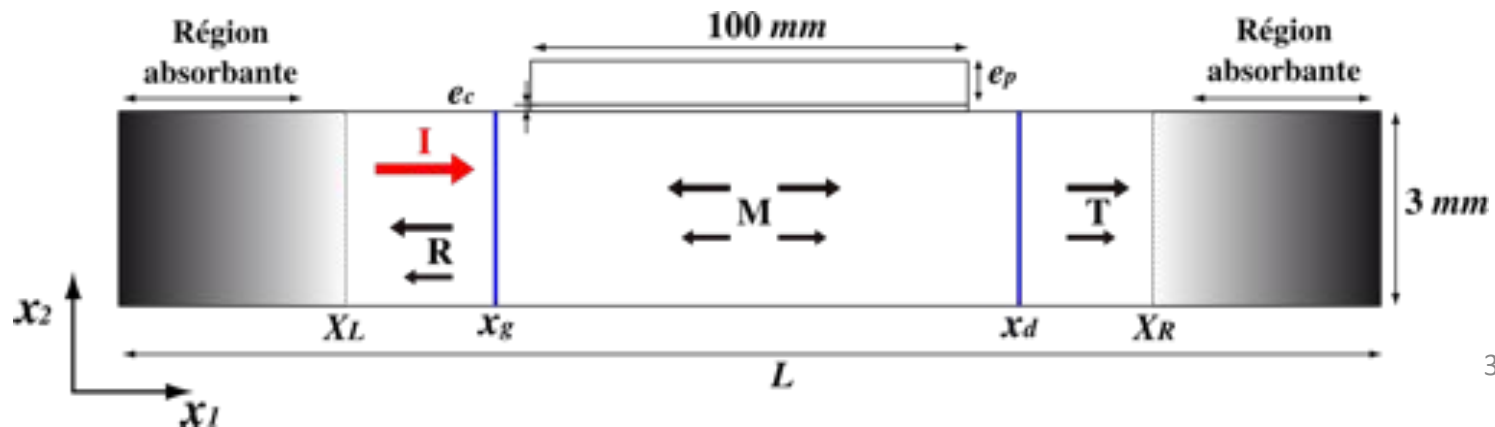
Principe des simulations numériques / Dispositif expérimental

Les mesures

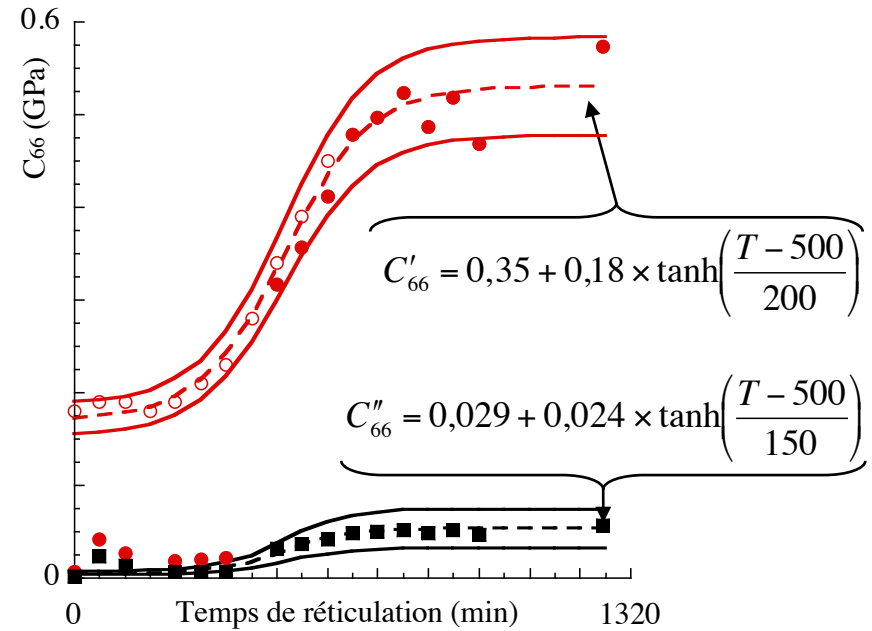
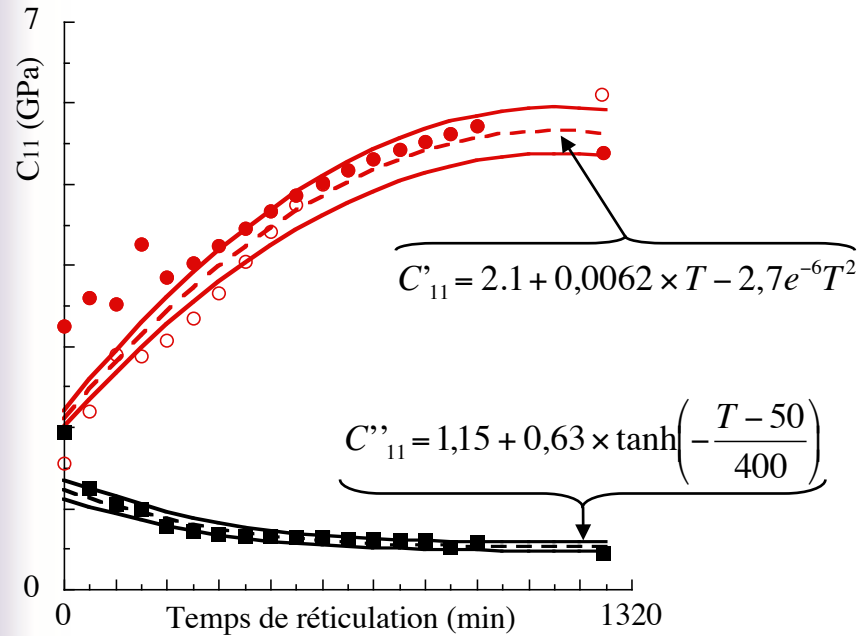
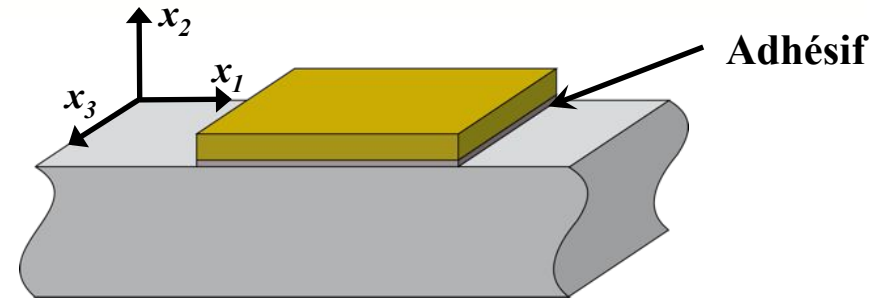
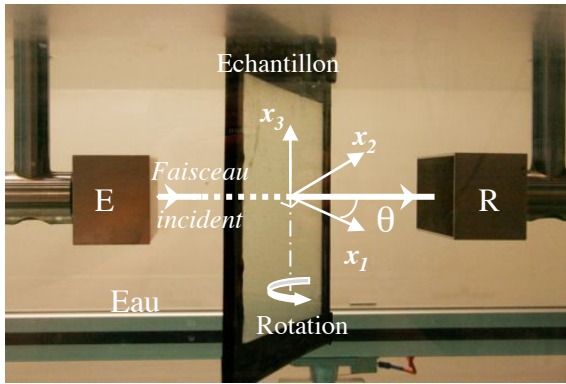


Coefficients de transmission $\rightarrow t_{A_0} = \left| \frac{Ampl_{A_0}^T}{Ampl_{A_0}^I} \right| \quad t_{S_0} = \left| \frac{Ampl_{S_0}^T}{Ampl_{S_0}^I} \right|$

Les simulations

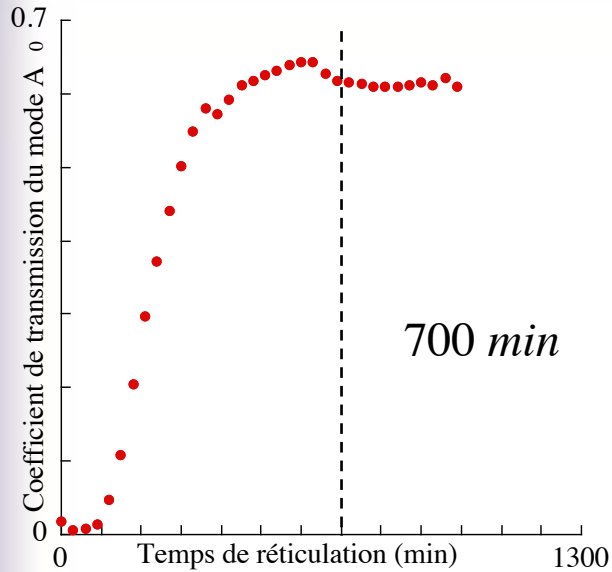


Les propriétés de la colle pendant le processus de réticulation



- ■ Mesures n°1
- Mesures n°2

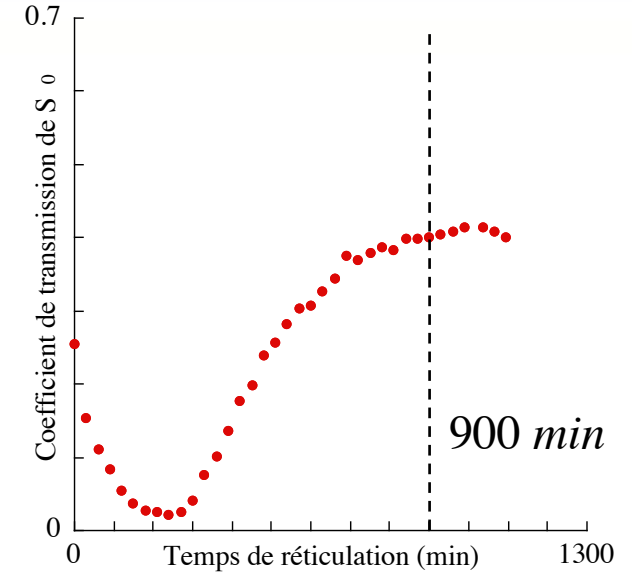
Mesures du coefficient de transmission (cas du patch en PLEXIGLAS)



700 min

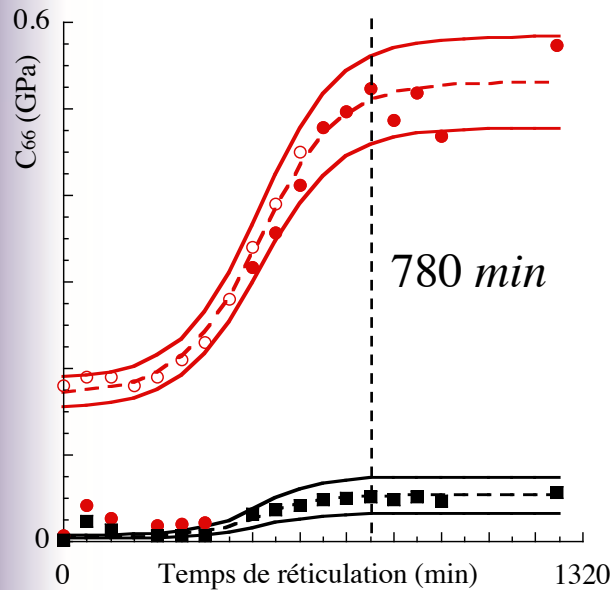
A_0 / C_{66}

à 400 kHz

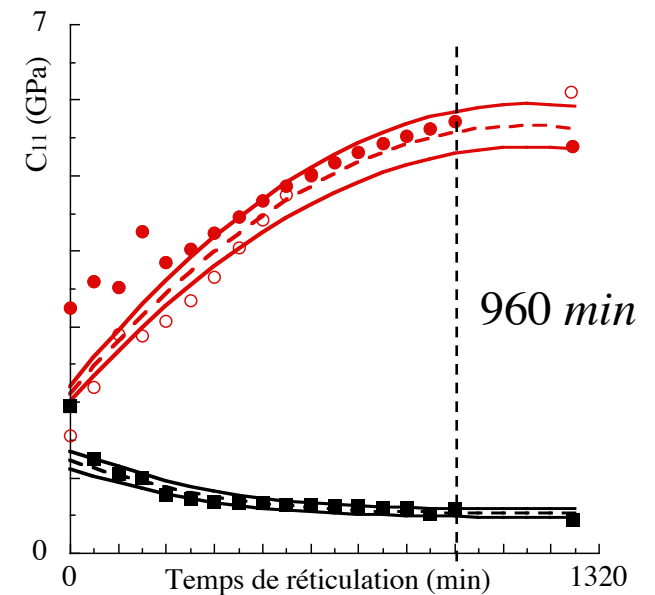
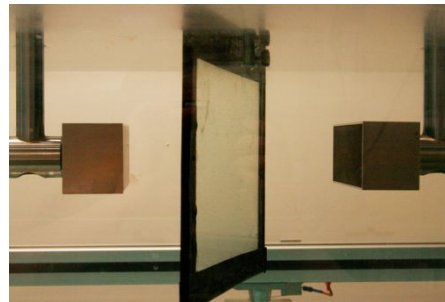


900 min

S_0 / C_{11}



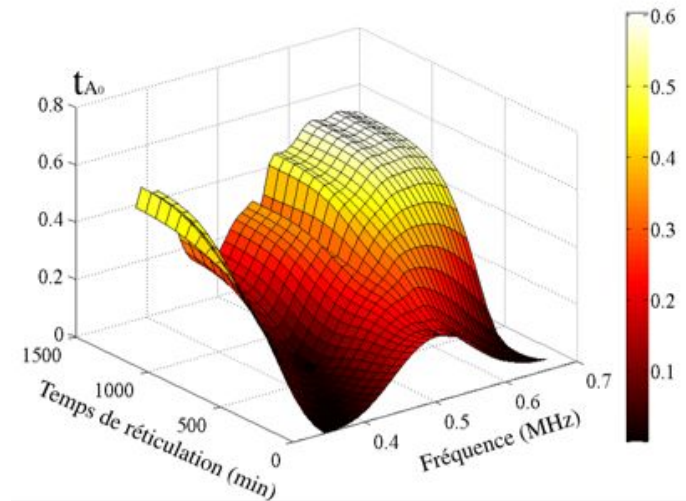
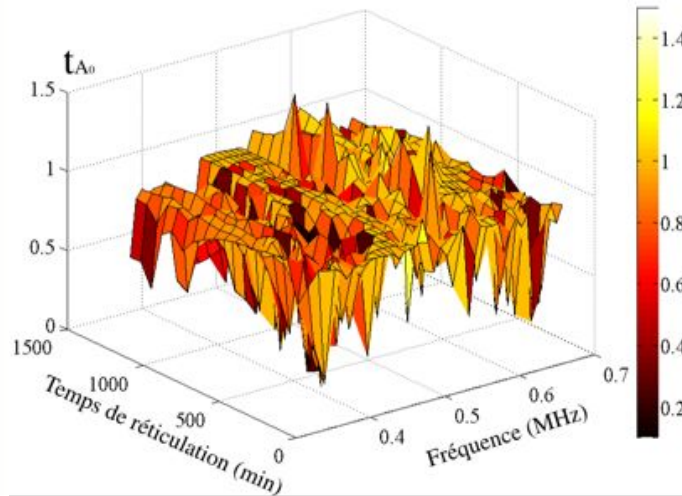
780 min



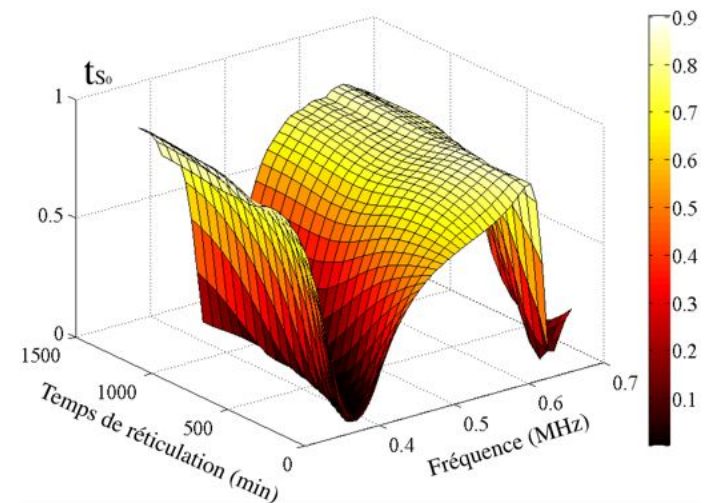
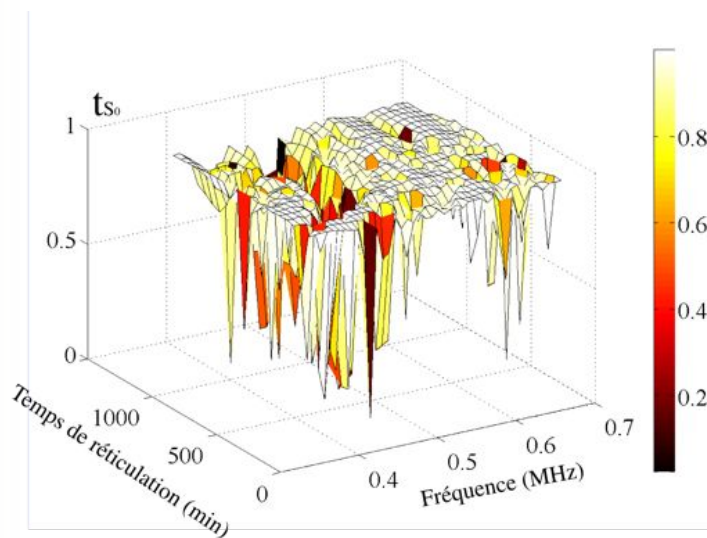
960 min

Importance de la viscoélasticité (cas du patch en PLEXIGLAS)

Mode A_0 incident

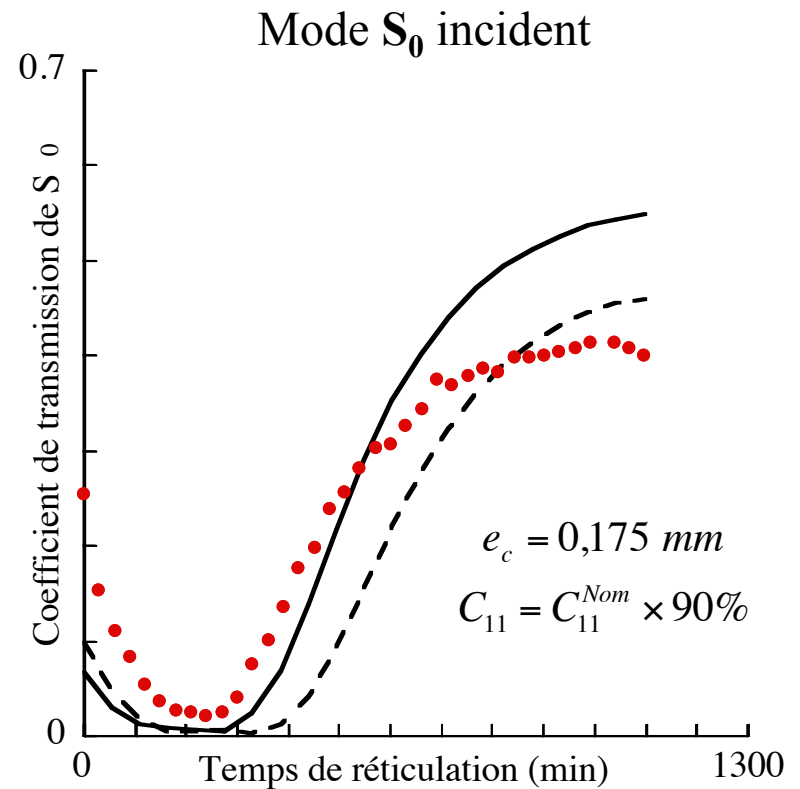
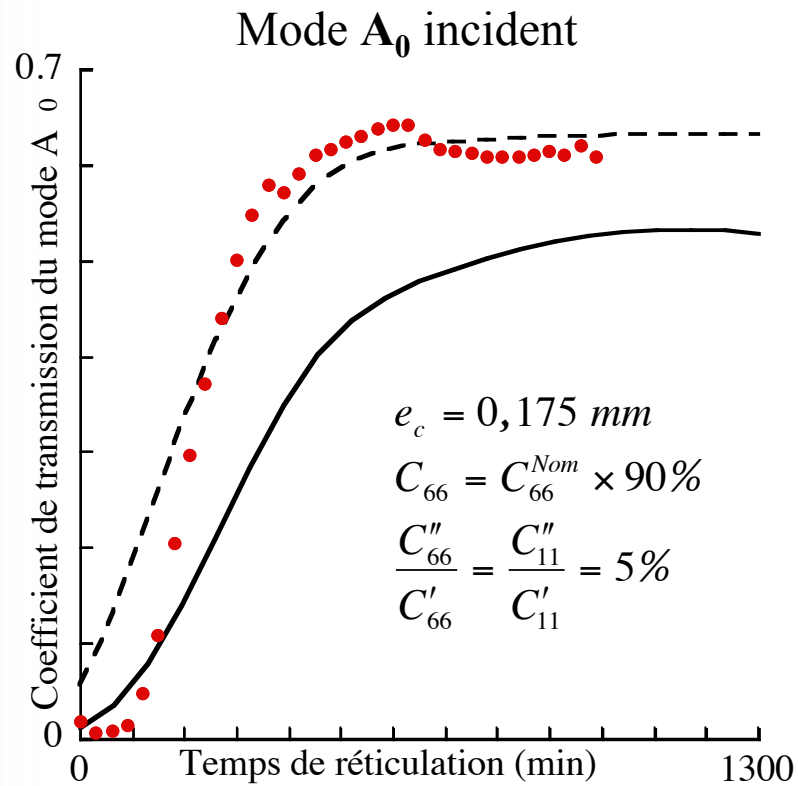


Mode S_0 incident



Vers la résolution du problème inverse (patch en PLEXIGLAS)

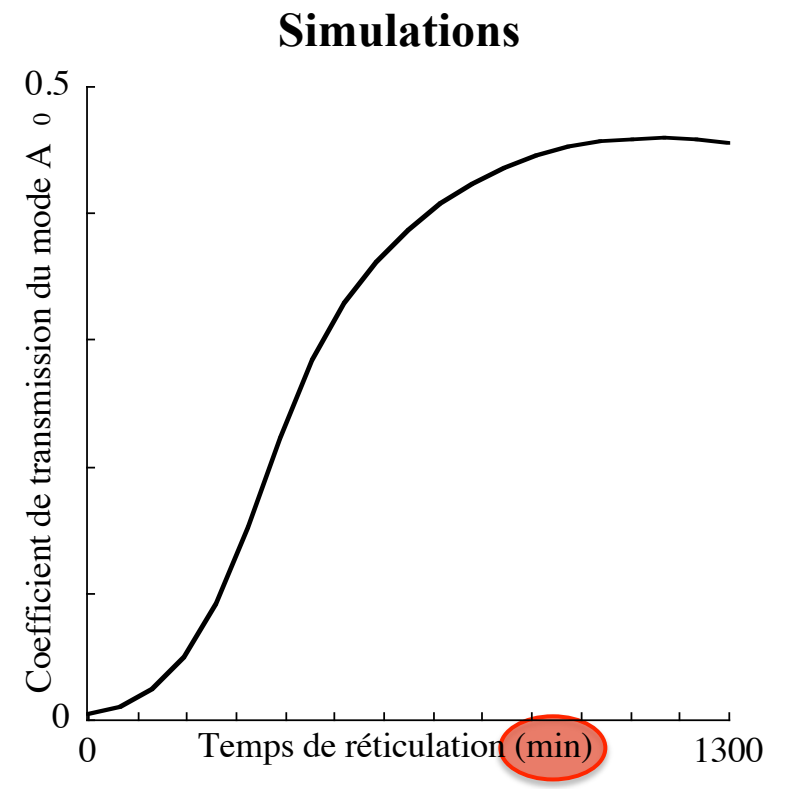
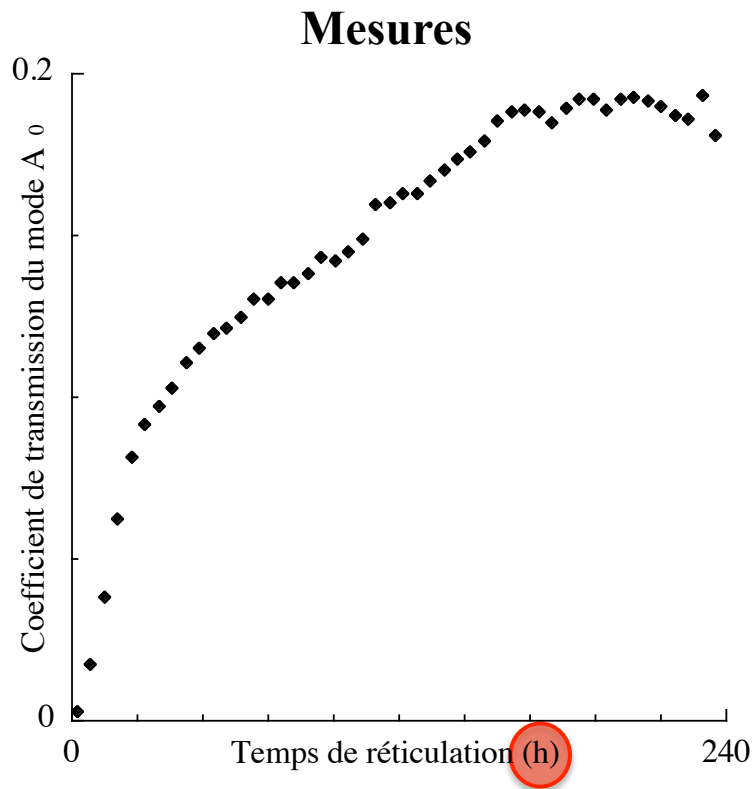
Joint de colle de **0,2 mm**
aluminium **sablé**



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

Mesures du coefficient de transmission (patch en COMPOSITE)

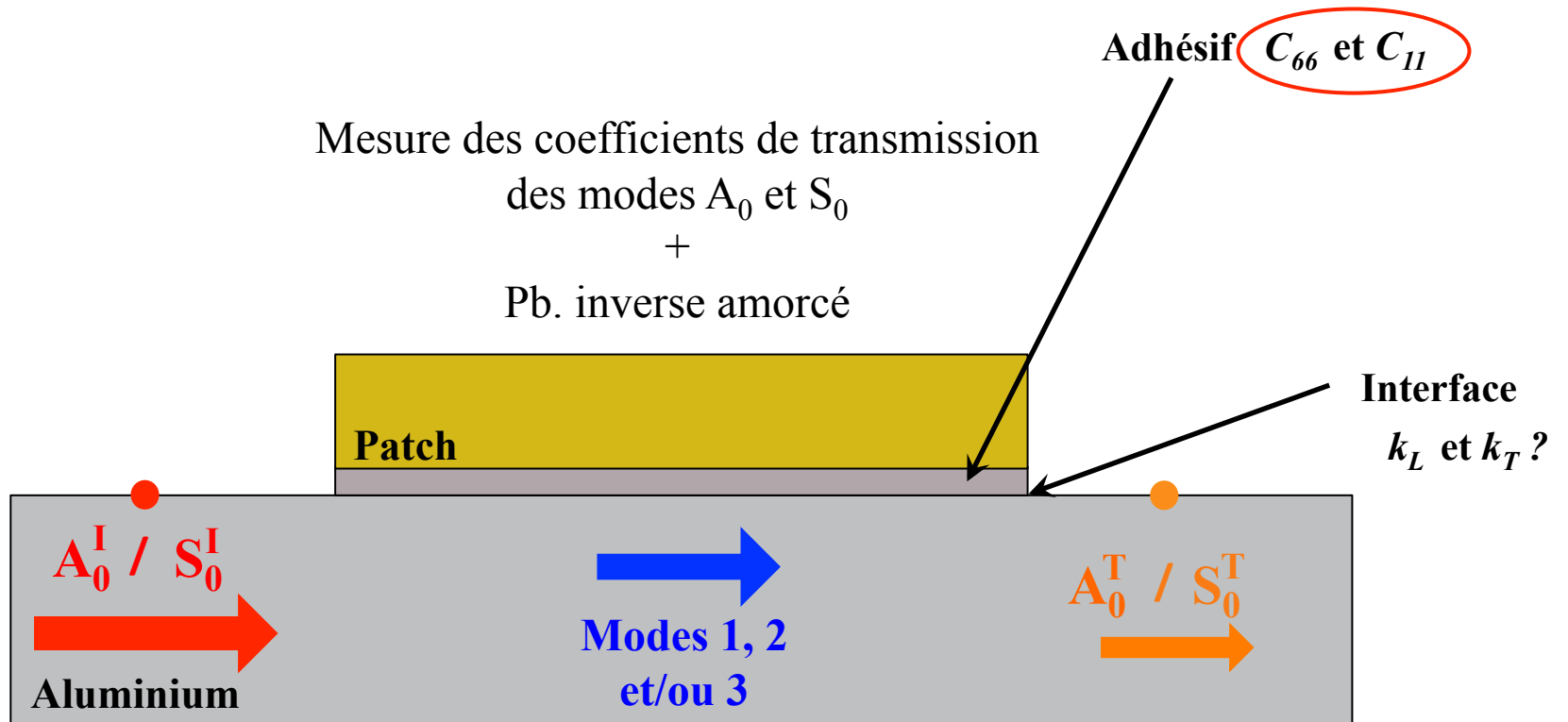
Mode A_0 incident
Joint de colle de **0,2 mm**
Aluminium sablé



= 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

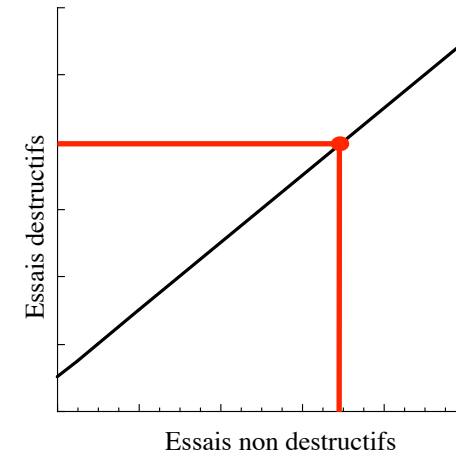


Corrélation ?

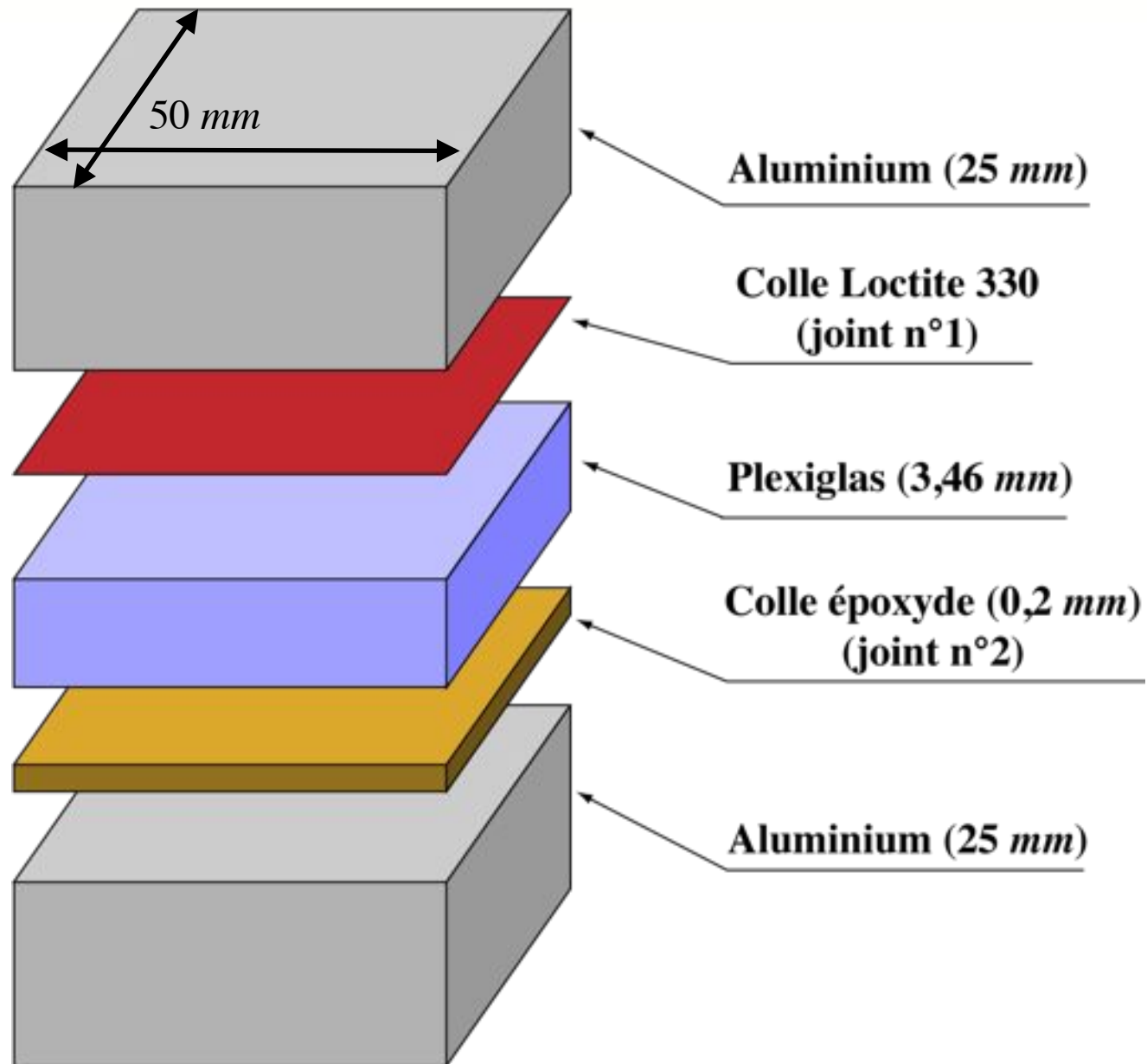
Si oui



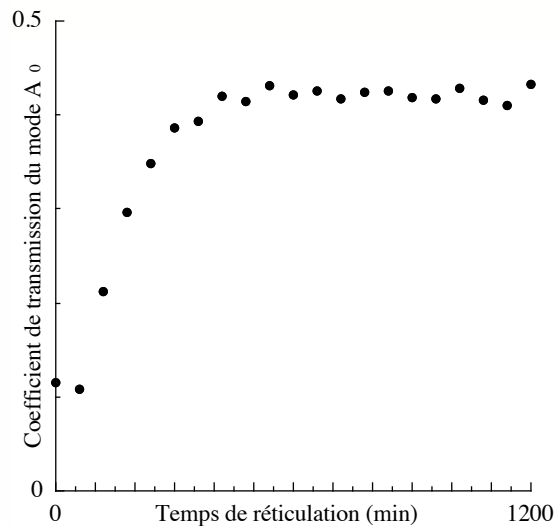
Remplacement des essais destructifs
par des essais non destructifs



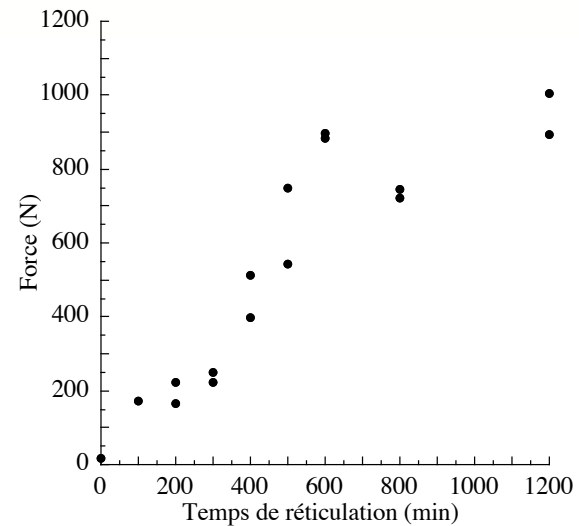
Présentation des éprouvettes de traction uni axiale



Confrontation essai US / traction (patch en PLEXIGLAS)



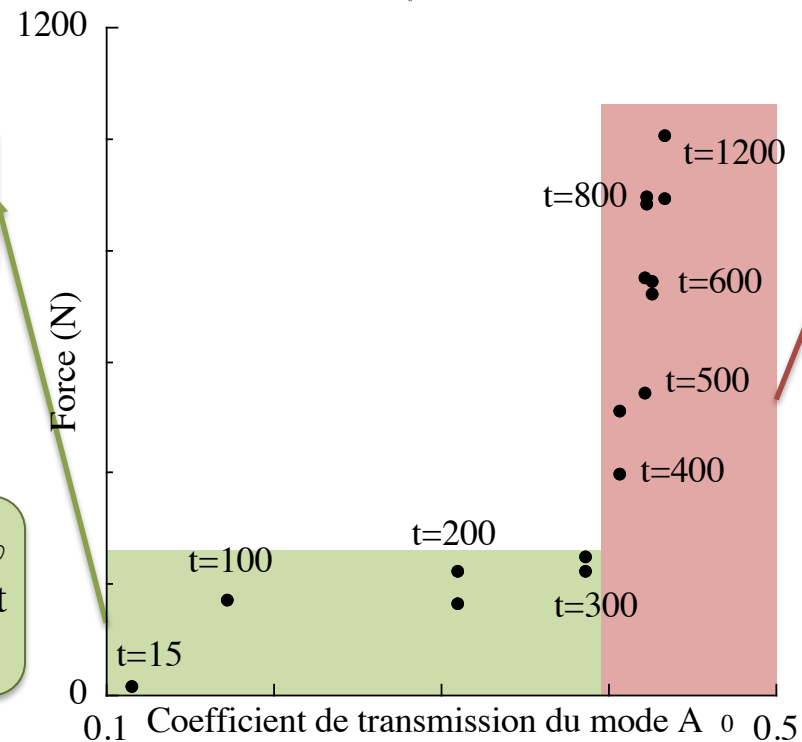
Confrontation



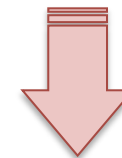
Forte variation de t_{A0} mais pas de la force d'arrachement



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

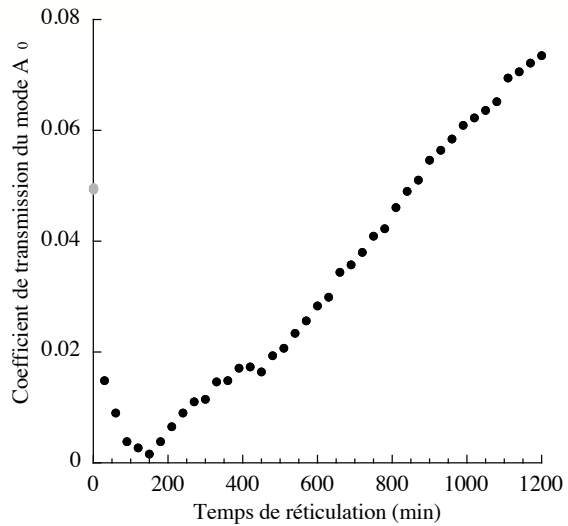


Faible variation de t_{A0} pour une forte variation de la force d'arrachement

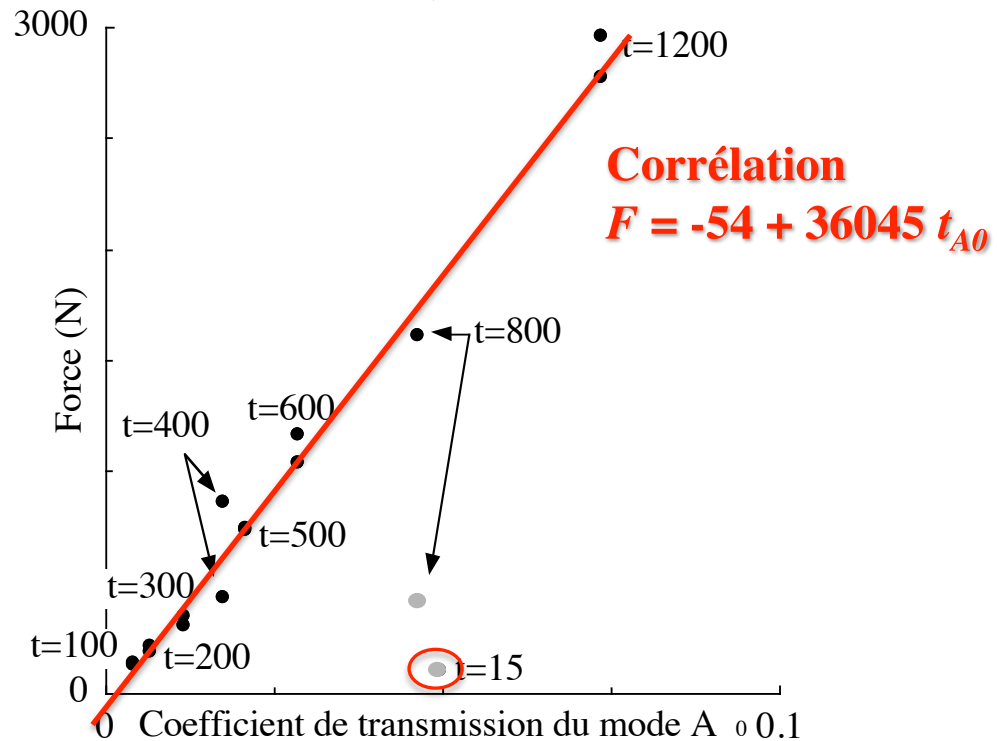
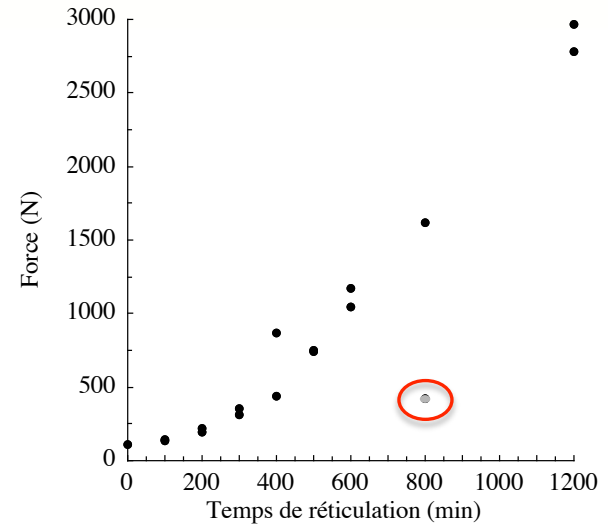


Si t_{A0} est déterminé à $\pm 5\%$ près alors F peut est estimée à $\pm 30\%$ près!

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*

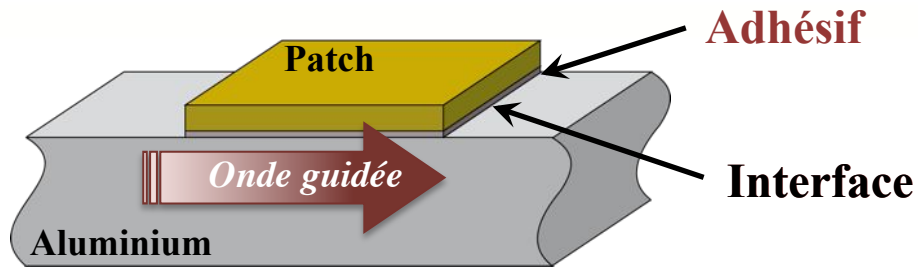
III. Les ondes de Lamb pour tester le collage

- ✓ *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

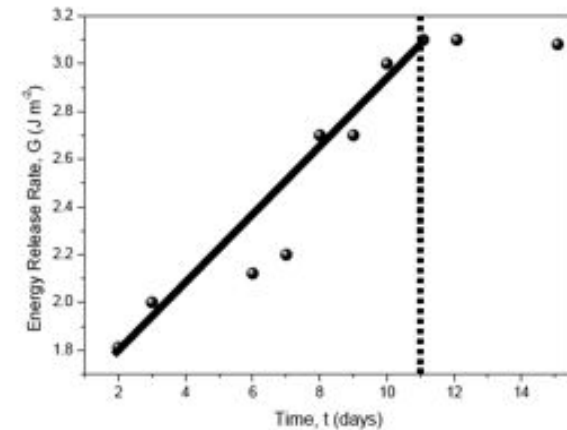
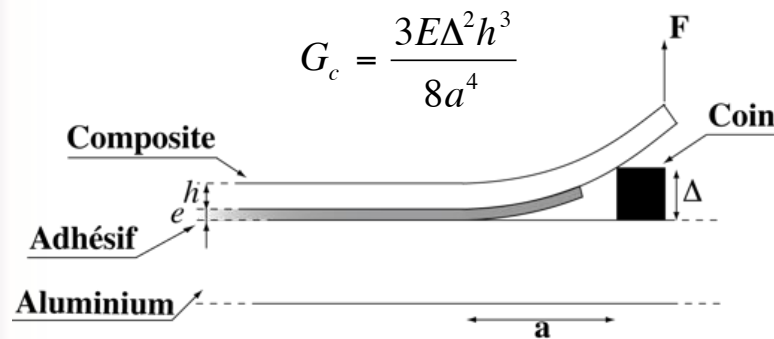
Corrélation essais US / traction uni axiale → F évolue linéairement en fonction de t_{A0}
(assemblage aluminium/colle/composite)

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 :

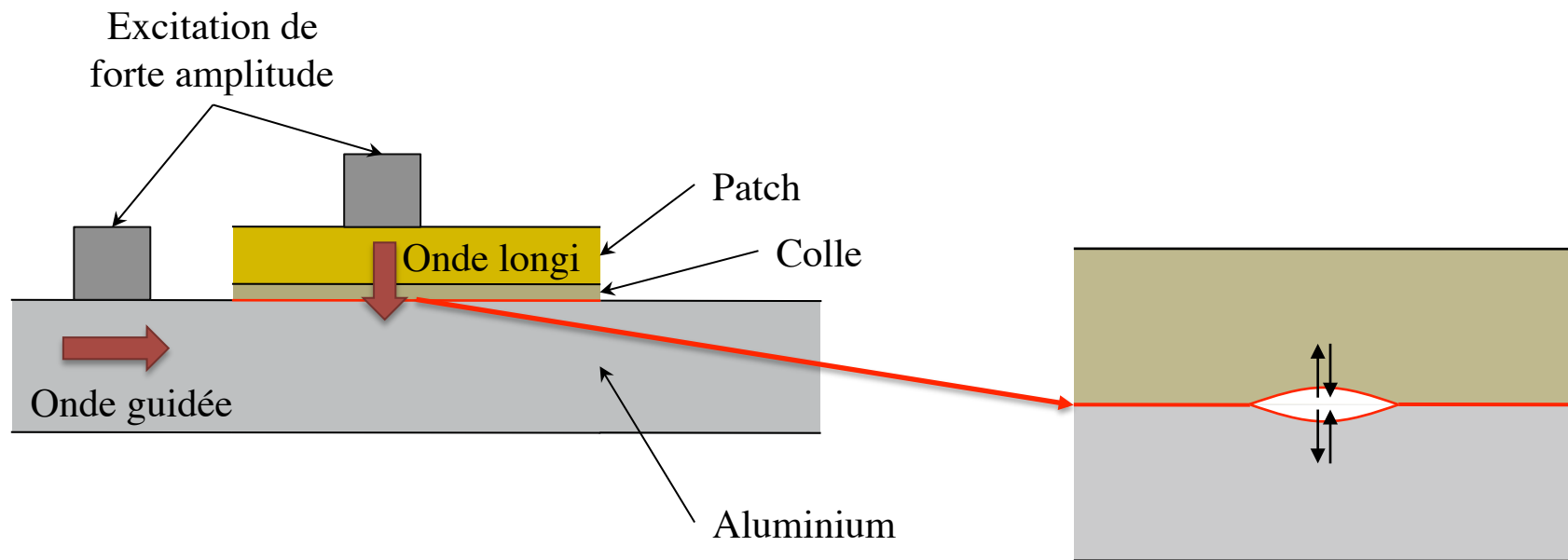
- ⇒ Comprendre pourquoi la colle réticule plus lentement lorsque le patch est en composite plutôt qu'en plexiglas

 - ⇒ 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 :

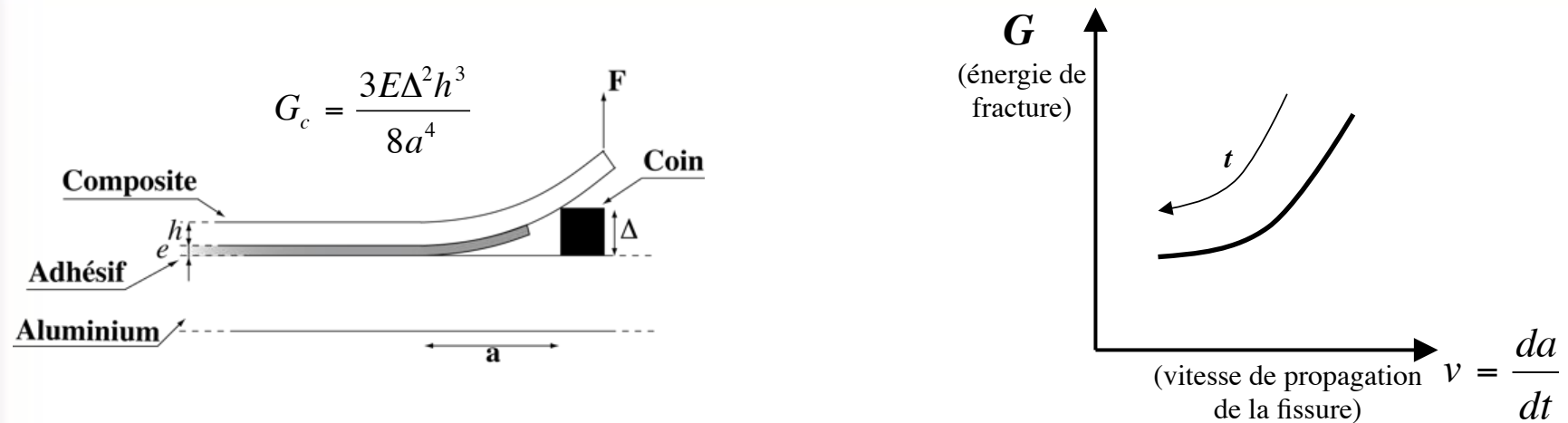
⇒ Exploiter la réponse non linéaire de l'interface aluminium/colle lorsqu'elle est soumise à une excitation ultrasonore de forte amplitude pour tenter de différencier plusieurs niveaux d'adhésion



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}

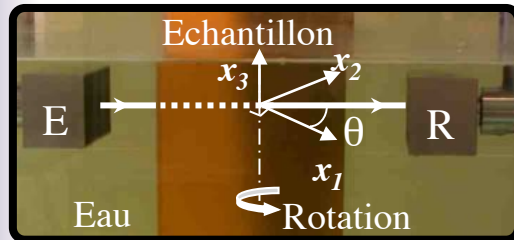
Mesure du champ acoustique transmis pour plusieurs angles d'incidence

$$A_k^{Exp}$$

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

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

?

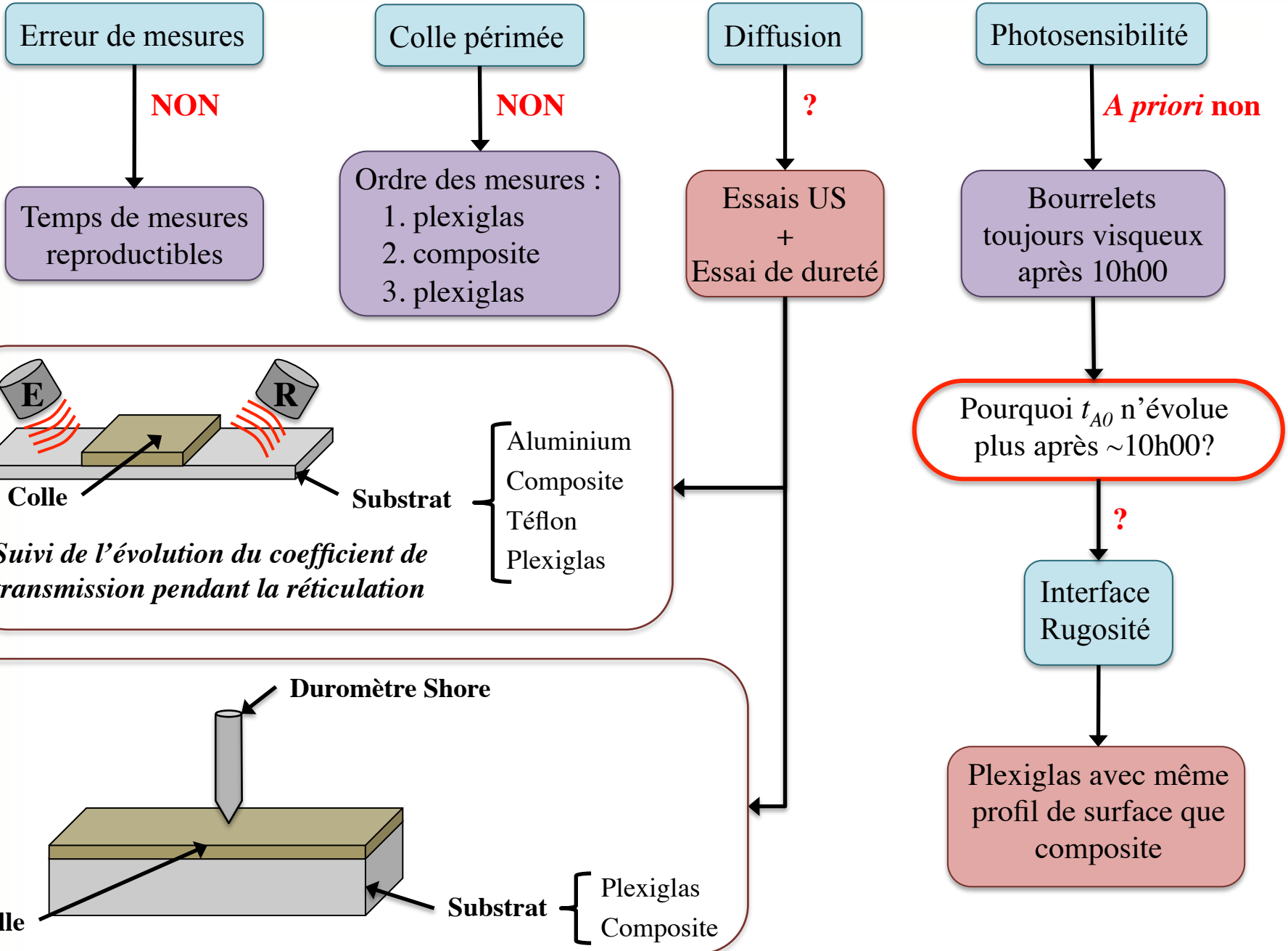
$$r_i = \frac{\Delta C_i}{C_i}$$

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

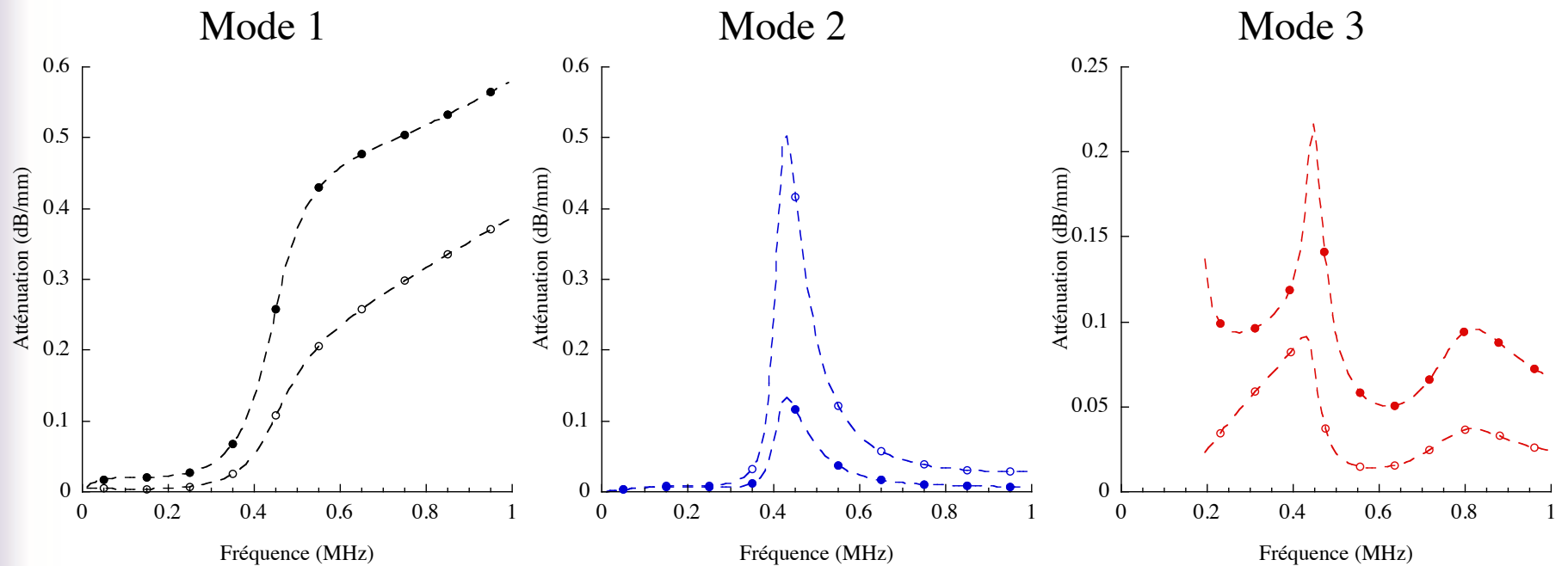
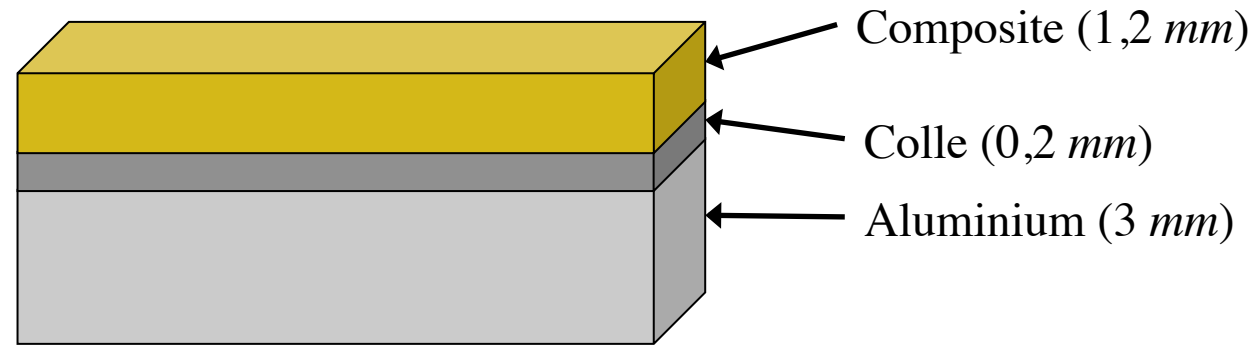
Matrice d'insensibilité de la fonction \mathcal{A} au paramètre C_i $\rightarrow \mathbf{I} = \mathbf{S}^{-1}$ où $\vec{S}_i = \left[C_i \frac{\partial \mathcal{A}(C_i)}{\partial C_i} \Big|_k \right]$

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



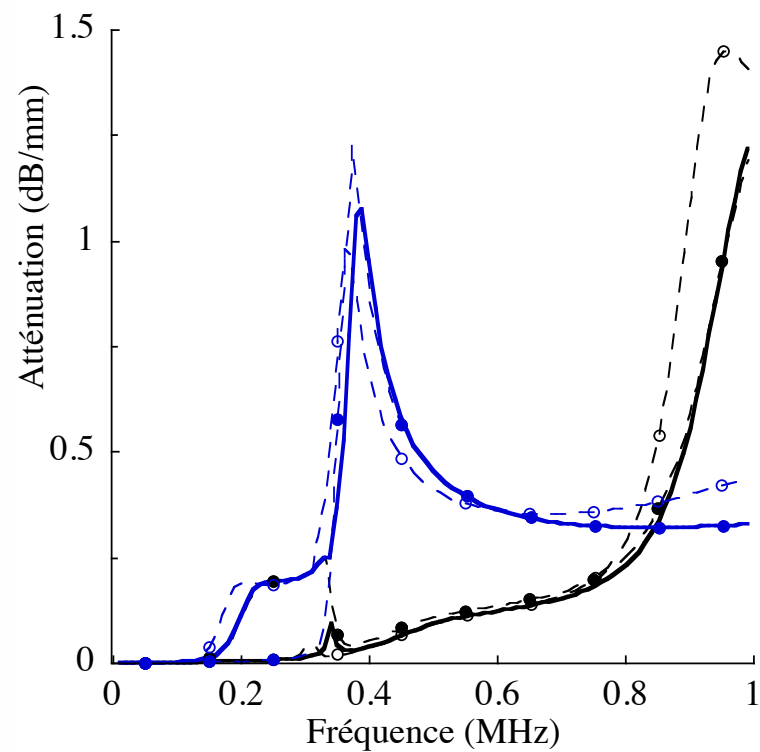
Les effets de la viscosité sur le calcul du coefficient de transmission



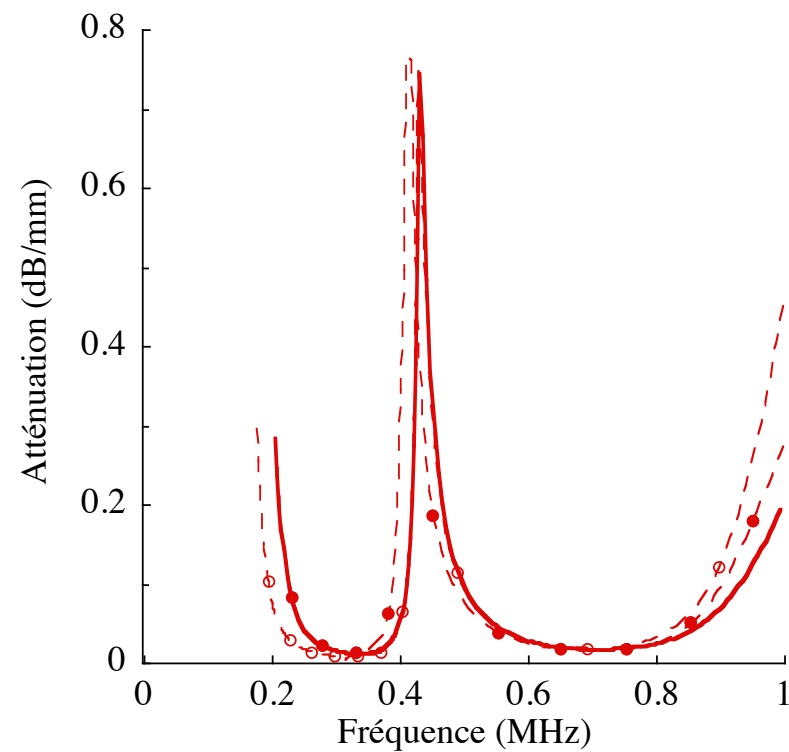
- ● --- Assemblage aux propriétés nominales
- ○ --- Assemblage avec colle élastique

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

Mode 1 et 2



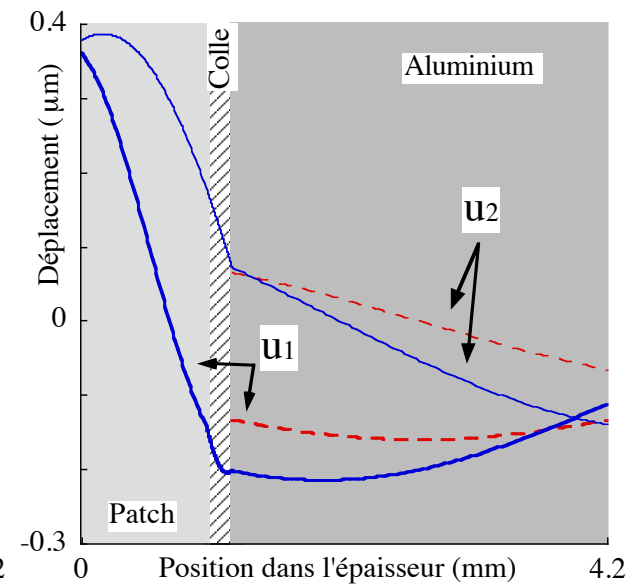
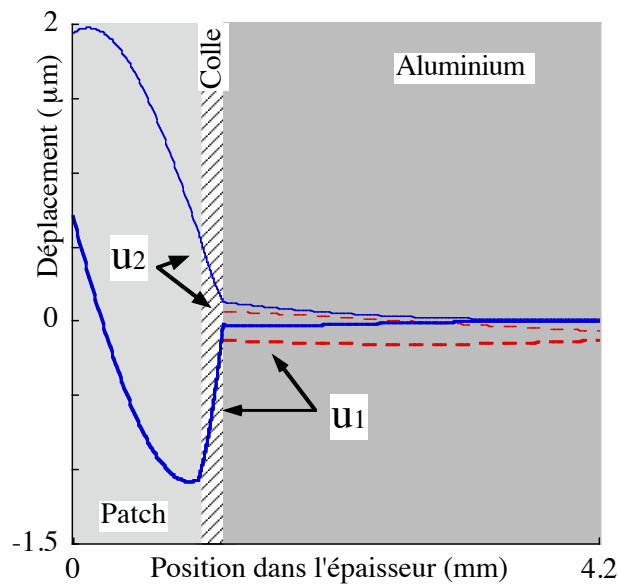
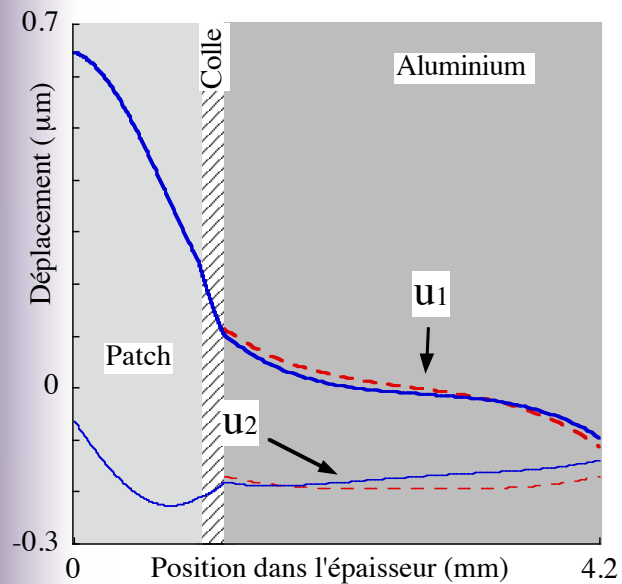
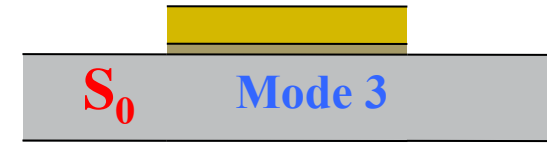
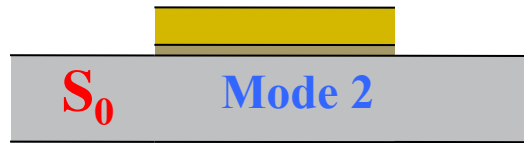
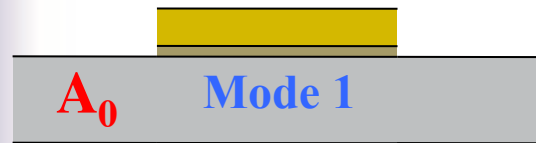
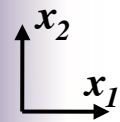
Mode 3



—●— C_{11} -40%

—○— C_{66} -40%

Choix du mode incident à 400 kHz



Mêmes conclusions que pour un patch en composite

- Mode A₀ incident depuis l'aluminium → Mode 1 de l'assemblage
- Mode S₀ incident depuis l'aluminium → Modes 2 et 3 de l'assemblage