



Propagation d'ondes modales dans des structures multicouches périodiques : application aux ondes de type Lamb et Rayleigh

Catherine POTEL

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM), UMR CNRS 6613. Le Mans - France

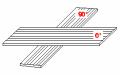


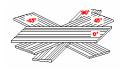
17 avril 2008 - Brest

LAUM

Domaines d'application

- Evaluation et Contrôle Non Destructifs
 - ✓ Comportement des composites en Carbone-Epoxyde
 - ✓ En particulier





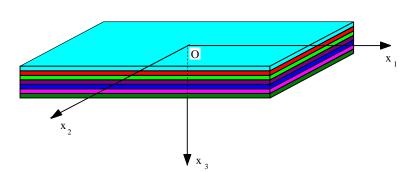
0°/90°

 $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/135^{\circ}$

• Géophysique, ...

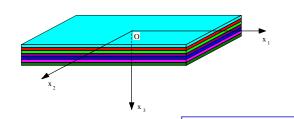
LAUM Ondes modales (1/3)

Ondes mécaniques ondes modales



LAUM

Ondes modales (2/3)



• O1

- ondes guidées
- ondes de surface
- ondes d'interface

- est bornée en x₃

- se propage le long des couches

énergie acoustique:

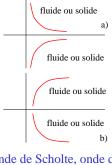
LAUM Ondes modales (3/3) ondes guidées Vide/ paroi rigide / impédance réactive vide Vide/ paroi rigide / impédance réactive vide

Ondes d'Osborne et Hart - onde de Rayleigh a) onde de <u>Lamb</u> - onde anti-modale b) mode So

> Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University

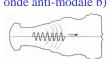
solide

ondes de surface ondes d'interface



- onde de Scholte, onde de Stoneley, onde de Rayleigh-Cezawa, etc... a)

- onde anti-modale b)



LAUM Plan

- Ondes modales en milieu multicouche périodique dépendant de deux fonctions de champs
 - ✓ Utilisation du théorème de Cayleigh-Hamilton
 - ✓ Deux familles d'ondes modales
- Ondes de Rayleigh en milieu multicouche anisotrope
- Faisceau d'ondes modales en milieu multicouche anisotrope
 - ✓ Déviation de faisceau par rapport au plan sagittal
 - ✓ Mise en évidence numérique et expérimentale

Université Maine

Courtesy of Patrick Lanceleur, UTC



Ondes modales en milieu multicouche périodique dépendant de deux fonctions de champs

en collaboration avec Philippe GATIGNOL et Jean-François de BELLEVAL

Laboratoire Roberval, Unité de Recherche en Mécanique (LRM, UMR CNRS 5253), Université de Technologie de Compiègne (UTC)

Ph. Gatignol, C. Potel, J.F. de Belleval, Acustica-Acta Acustica, 93(6), 959-975, (2007)







LAUM

Milieu multicouche périodique

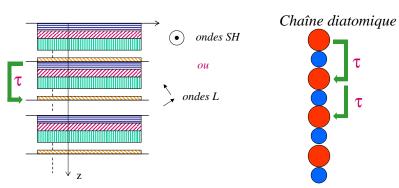


- ondes de compression en milieu fluide

- ondes transversales horizontales en milieu solide - chaîne diatomique périodique d'atomes

avec 2 fonctions de champ

structures décrites



Conditions aux frontières

• Equations de propagation

τ : matrice de transfert d'1 période

LAUM

s dépend de :



• Vecteur déplacements - contraintes :

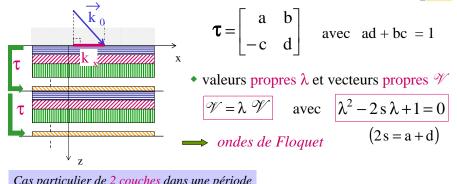


- $\mathscr{W}(z_p) = \begin{cases} \vec{u}_p \\ \vec{T}_p \end{cases}$
- Conditions aux limites :
 - égalité des déplacements \vec{u}_p – égalité des contraintes
 - $\mathcal{W}(\mathbf{z}_{n}) = \boldsymbol{\tau} \mathcal{W}(\mathbf{z}_{n-1})$

T: matrice de transfert d'une période

LAUM Matrice de transfert d'une période (2/2)





Cas particulier de 2 couches dans une période

$$s(K_{0}, K_{x}) = \cos(\sqrt{K_{1}^{2} - K_{x}^{2}} K_{0} \eta_{1}) \cos(\sqrt{K_{2}^{2} - K_{x}^{2}} K_{0} \eta_{2})$$

$$-\frac{1}{2} \left[\tilde{\rho} \frac{\sqrt{K_{2}^{2} - K_{x}^{2}}}{\sqrt{K_{1}^{2} - K_{x}^{2}}} + \frac{1}{\tilde{\rho}} \frac{\sqrt{K_{1}^{2} - K_{x}^{2}}}{\sqrt{K_{2}^{2} - K_{x}^{2}}} \right] \sin(\sqrt{K_{1}^{2} - K_{x}^{2}} K_{0} \eta_{1}) \sin(\sqrt{K_{2}^{2} - K_{x}^{2}} K_{0} \eta_{2})$$

$$K_{x} = \frac{k_{x}}{k_{0}} ; K_{0} = k_{0} h = \frac{\omega h}{V_{0}} ; K_{q} = \frac{V_{0}}{V_{q}} ; \eta_{q} = \frac{h_{q}}{h} ; \tilde{\rho} = \frac{\rho_{1}}{\rho_{2}}$$

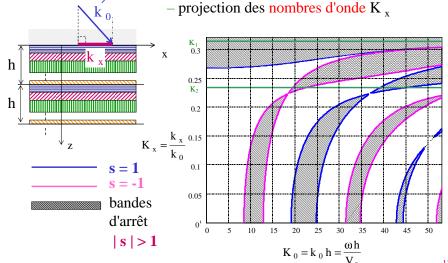
Bandes d'arrêt et bandes passantes



10

12

– propriétés de la structure (V, ρ, h) - fréquence proportionelle à K₀



LAUM

Modes guidés (1/2)



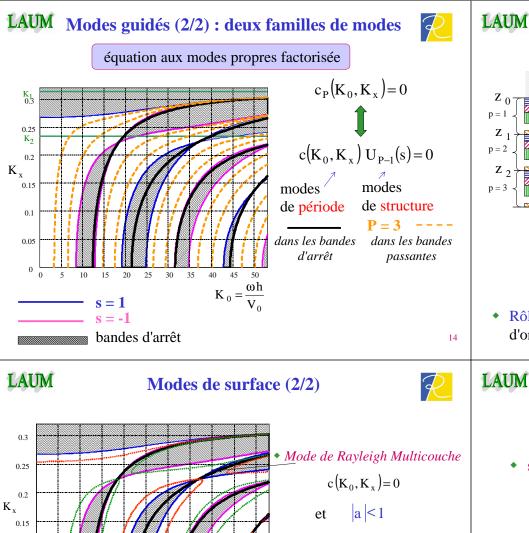
structure finie z₀ vide $\boldsymbol{\tau}^{P} = \begin{bmatrix} a_{P} & b_{P} \\ -c_{P} & d_{P} \end{bmatrix} = U_{P-1}(s) \boldsymbol{\tau} - U_{P-2}(s) \mathcal{I}$ Z_P vide

Matrice de transfert de toute la structure

Polynômes de Tchebychev $\mathscr{W}(z_{P}) = \boldsymbol{\tau}^{P} \mathscr{W}(z_{O})$

$$\begin{cases} \mathbf{w}_{P} = \mathbf{a}_{P} \mathbf{w}_{0} + \mathbf{b}_{P} \mathbf{T}_{0} \\ \mathbf{T}_{P} = -\mathbf{c}_{P} \mathbf{w}_{0} + \mathbf{d}_{P} \mathbf{T}_{0} \end{cases}$$

• Conditions aux frontières : T $_0 = 0$ $c_{P}(K_{0},K_{x})=0$

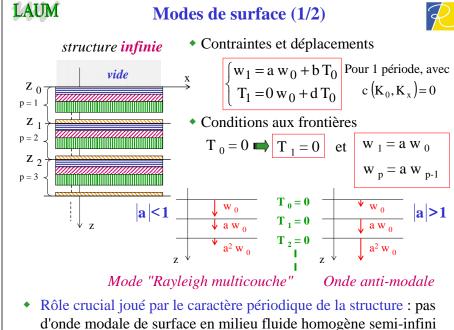


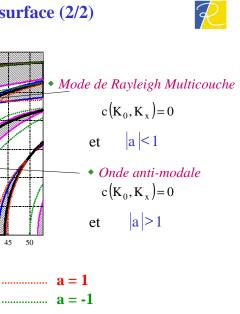
0.1

0.05

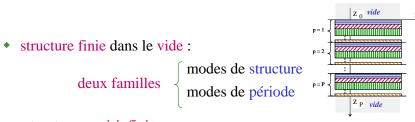
20 25 30

Bandes d'arrêt

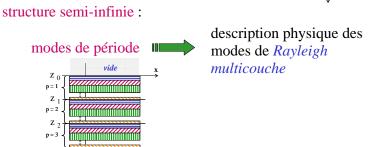




-c = 0 modes de période



En résumé



Plan

- Ondes modales en milieu multicouche périodique dépendant de deux fonctions de champs
 - ✓ Utilisation du théorème de Cayleigh-Hamilton
 - ✓ Deux familles d'ondes modales
- Ondes de Rayleigh en milieu multicouche anisotrope
- Faisceau d'ondes modales en milieu multicouche anisotrope
 - ✓ Déviation de faisceau par rapport au plan sagittal
 - ✓ *Mise en évidence numérique et expérimentale*

Université Maine



Ondes de Rayleigh en milieu multicouche anisotrope

en collaboration avec J-F de Belleval, A.U. Rehman, J.M. Gherbezza

Laboratoire Roberval, Unité de Recherche en Mécanique (LRM, UMR CNRS 5253), Université de Technologie de Compiègne (UTC)

et Oswald Leroy, Stéphane Devolder, Martine Wevers

Interdisciplinary Research Centre, Katholieke Universiteit Leuven (KUL) - Belgium

- C. Potel, J.F. de Belleval, J. Appl. Phys., 77, 12, 6152-6161, (1995)
- C. Potel, S. Devolder, A.U. Rehman, J.F. de Belleval, J.M. Gherbezza, O. Leroy, M. Wevers, J. Appl. Phys., 86, 2, 1128-1135, (1999)

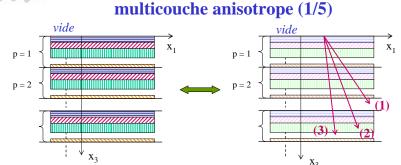


18





Ondes de Rayleigh multicouche en milieu LAUM multicouche anisotrope (1/5)



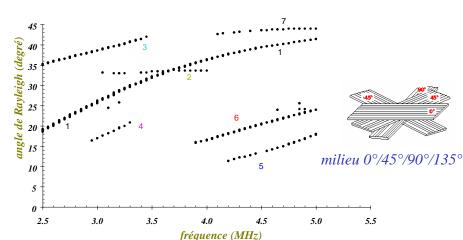
Ondes de Floquet

LAUM

- modes de propagation du milieu multicouche périodique infini
- solutions indépendantes liées aux valeurs propres et vecteurs propres de la matrice τ de transfert d'une période
- Onde de Rayleigh multicouche
 - Onde modale de surface
 - Combinaison linéaire de 3 ondes de Floquet inhomogènes (en milieu multicouche anisotrope)

Onde dispersive

Ondes de Rayleigh multicouche en milieu LAUM multicouche anisotrope (2/5)



Courbes de dispersion obtenues par annulation d'un déterminant (3x3)



LAUM Ondes de Rayleigh multicouche en milieu multicouche anisotrope (3/5): comparaisons expérimentales



• Prouver expérimentalement l'existence des ondes de Rayleigh multicouche



comment?

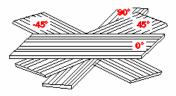
• technique acousto-optique développée à : Katholieke Universiteit Leuven (KUL) - Belgique



sur quoi?

 $\rho_0/\rho_1 = 0,1$

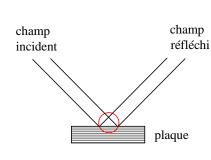
• plaque composite en carbone/époxyde



LAUM

Technique acousto-optique

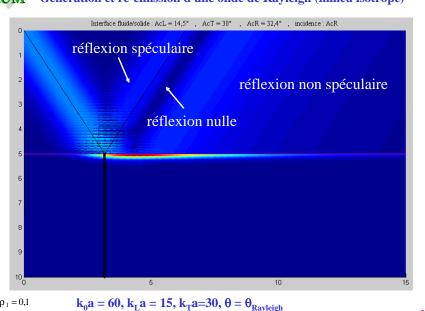




- Interaction d'un faisceau laser avec les ultrasons
- Faisceau laser perpendiculaire aux ondes incidentes et réfléchies, diffracté par elles.
- Images de strioscopie pour différents angles et fréquences

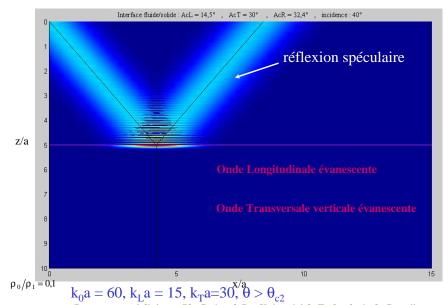


LAUM Génération et ré-émission d'une onde de Rayleigh (milieu isotrope)



Programmes réalisés par Ph. Gatignol, Pr., Université de Technologie de Compiègne

LAUM Après les deux angles critiques, pas d'onde de Rayleigh

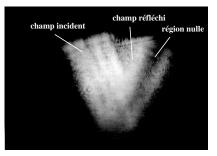


24 Programmes réalisés par Ph. Gatignol, Pr., Université de Technologie de Compiègne

Images de strioscopie



plaque composite 0°/45°/90°/135° (24 couches)

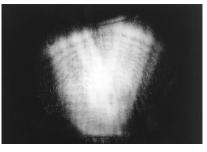


région nulle

→ angle caractéristique



$$f = 3 MHz$$
; $\theta = 20^{\circ}$
mode \mathscr{G}



pas de région nulle

→ pas d'angle caractéristique

$$f = 3 MHz$$
; $\theta = 16^{\circ}$

26

LAUM Plan

- Ondes modales en milieu multicouche périodique dépendant de deux fonctions de champs
 - ✓ *Utilisation du théorème de Cayleigh-Hamilton*
 - ✓ Deux familles d'ondes modales
- Ondes de Rayleigh en milieu multicouche anisotrope
- Faisceau d'ondes modales en milieu multicouche anisotrope
 - ✓ Déviation de faisceau par rapport au plan sagittal
 - ✓ Mise en évidence numérique et expérimentale







Faisceau d'ondes modales en milieu multicouche anisotrope

en collaboration avec Stéphane BALY, Jean-François de BELLEVAL, Philippe GATIGNOL

Laboratoire Roberval, Unité de Recherche en Mécanique (LRM, UMR CNRS 5253), Université de Technologie de Compiègne (UTC)

et Mike LOWE

Imperial College, Department of Mechanical Engineering, Londres - Grande Bretagne

C. Potel, S. Baly, J.F. de Belleval, M. Lowe, Ph. Gatignol, IEEE Trans. Ultrasonics Ferroel. Freq. Contr., 52 (6), 987-1001, (2005)



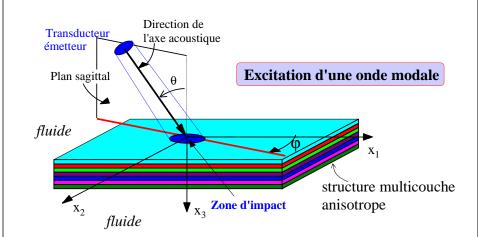




LAUM

Position du problème









LAUM

Transducteur

Plan sagittal

émetteur

Phénomène physique

Faisceau d'ondes modales

Direction de

l'axe acoustique



Direction de déviation

du faisceau modal hors du plan sagittal

- Faisceau d'ondes modales en milieu multicouche anisotrope
 - Description qualitative du phénomène physique
 - ✓ Modélisation et résultats numériques associés
 - ✓ Comparaisons expérimentales

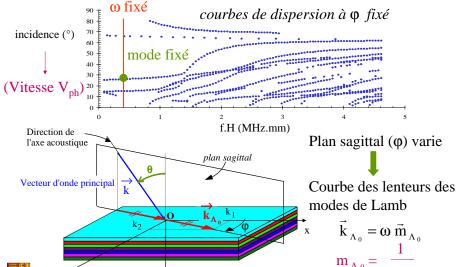




LAUM

Visée d'un mode de Lamb

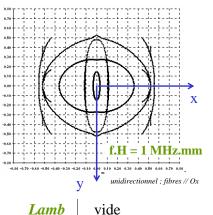




LAUM

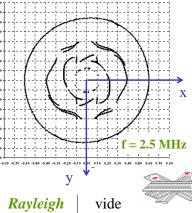
Courbes des lenteurs modales





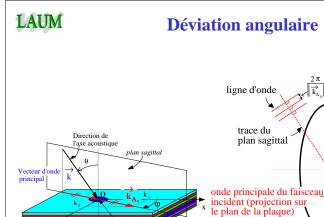
vide





milieu stratifié





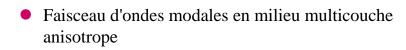


ω fixé

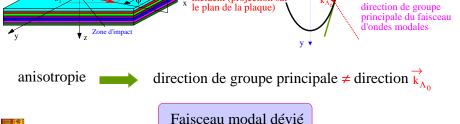
tangente

branche F





- ✓ Description qualitative du phénomène physique
- ✓ Modélisation et résultats numériques associés
- ✓ Comparaisons expérimentales





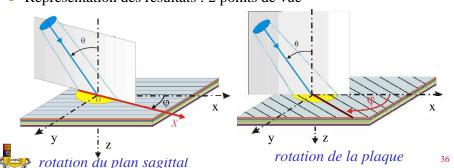
LAUM

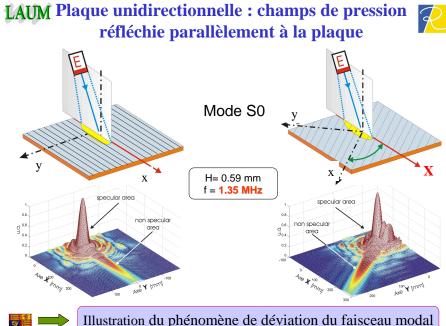
Résultats numériques

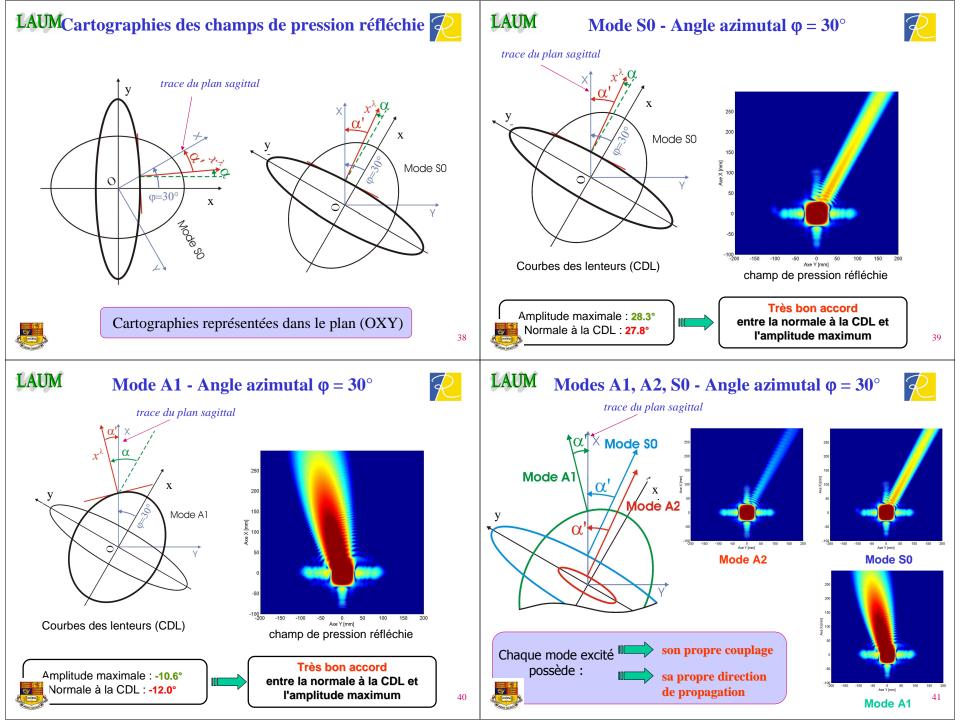
R

34

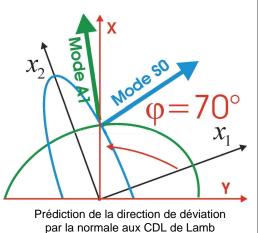
- Logiciel de calcul de champs réfléchis et transmis :
 - Décomposition du faisceau incident en ondes planes monochromatiques
 - Prise en compte des coefficients de réflexion et de transmission
 - Recomposition des faisceaux réfléchis et transmis
- Représentation des résultats : 2 points de vue







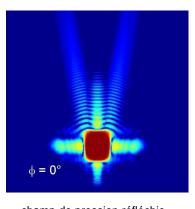
LAUM Variation de la direction de déviation en fonction de l'angle azimutal (1/2) $\phi = 0^{\circ}$ champ de pression réfléchie

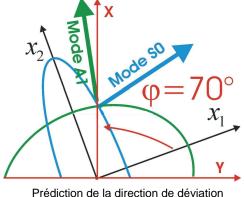




Variation de la direction de déviation en fonction de l'angle azimutal (2/2)







champ de pression réfléchie

par la normale aux CDL de Lamb

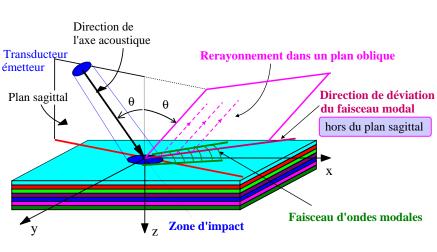


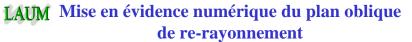


42

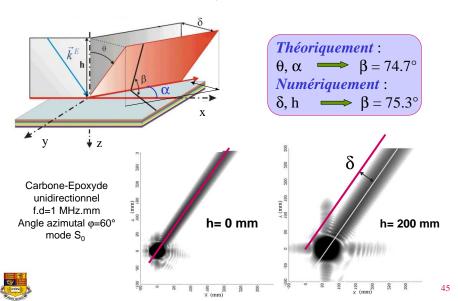
LAUM Plan oblique de re-rayonnement













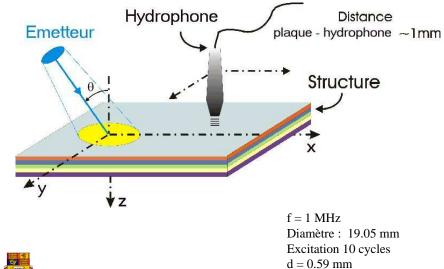
LAUM

Montage expérimental



- Faisceau d'ondes modales en milieu multicouche anisotrope
 - ✓ Description qualitative du phénomène physique
 - ✓ Modélisation et résultats numériques associés
 - Comparaisons expérimentales





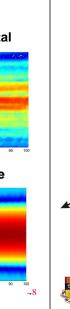


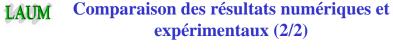


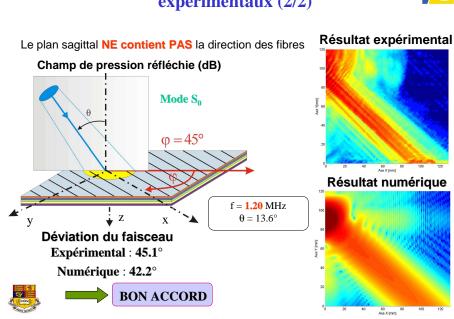
47

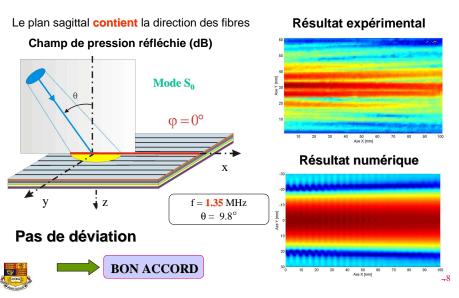
Comparaison des résultats numériques et LAUM expérimentaux (1/2)







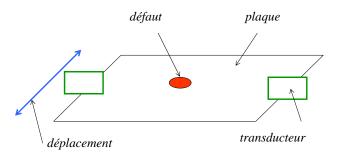






Conclusions





- Défaut propagation de l'onde perturbée
- Mais il faut tenir compte de l'anisotropie

