

# Ondes guidées dans une plaque hyperélastique étirée

Alexandre Delory<sup>1,2</sup>, Fabrice Lemoult<sup>1</sup>, Antonin Eddi<sup>2</sup>, Claire Prada<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris, France

<sup>2</sup> PMMH, CNRS, ESPCI Paris, Université PSL, Sorbonne Université, Université de Paris, F-75005, Paris, France

alexandre.delory@espci.psl.eu

La plupart des milieux biologiques sont mous et quasi-incompressibles, ce qui implique que les ondes longitudinales se propagent à une vitesse  $V_L$  qui est plusieurs ordres de grandeur plus grande que la vitesse  $V_T$  de propagation des ondes transverses. Dans ces milieux, à différentes échelles, les processus physiologiques impliquent bien souvent des ondes élastiques. Il existe, entre autres, des ondes de pression dans les membranes lipidaires à l'échelle cellulaire, des ondes stationnaires dans les cordes vocales et une onde mécanique guidée le long de la membrane basilaire dans la cochlée.

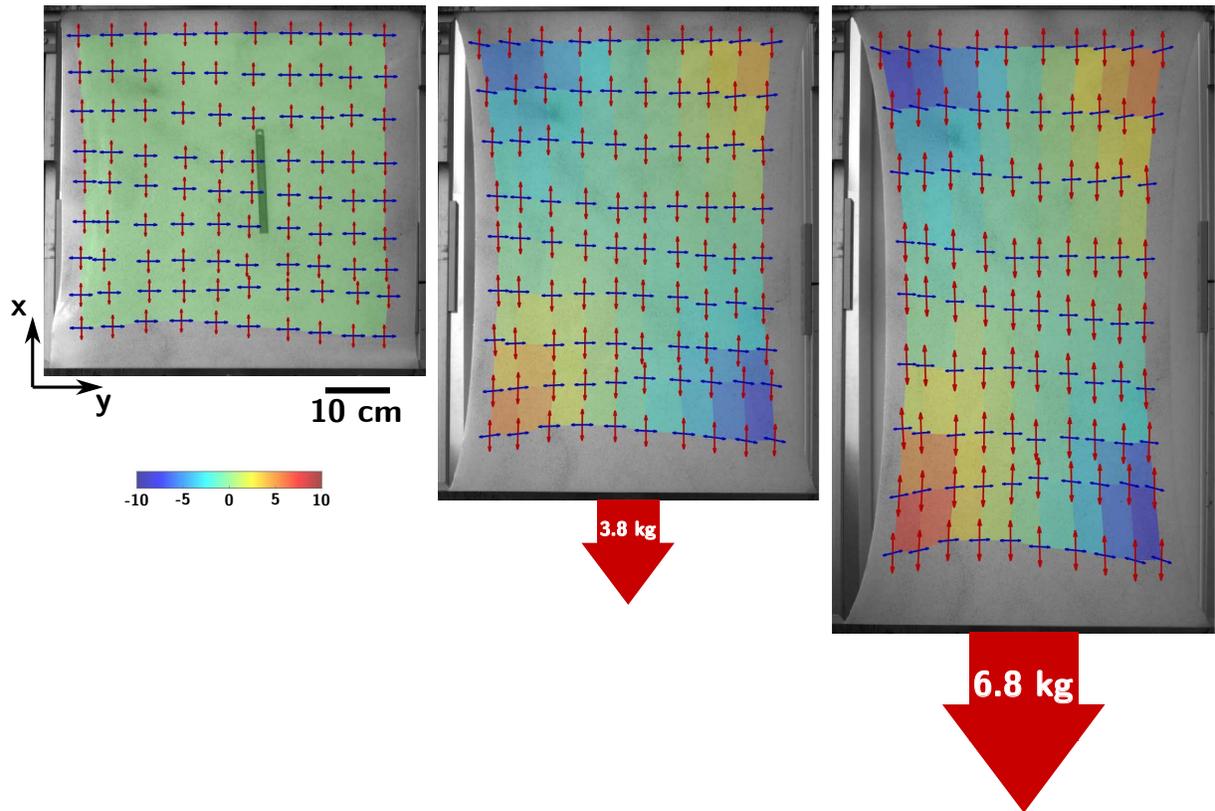
Ici, nous considérons un guide d'onde particulier constitué d'une plaque en élastomère mou et quasi-incompressible (silicone commercial Ecoflex<sup>®</sup>) tel que  $V_L/V_T \approx 200$ . À basse fréquence, trois ondes élastiques guidées coexistent indépendamment dans une plaque. Parmi elles,  $SH_0$  et  $S_0$  (premier mode de Lamb symétrique) sont des ondes non-dispersives et polarisées « dans le plan ».  $SH_0$  se propage à  $V_T$  et  $S_0$  se propage à la vitesse de plaque  $V_P = 2V_T$ , indépendante de  $V_L$  malgré sa polarisation en apparence longitudinale. Ces modes sont observés à l'aide d'une méthode adaptée de [1] où une caméra équipée d'un téléobjectif filme stroboscopiquement la plaque, le champ de déplacement « dans le plan » est mesuré et les deux vitesses  $V_T$  et  $V_P$  sont mesurées.

Cette plaque est ensuite soumise à une tension uniaxiale (Fig.1) avec une élongation pouvant atteindre plus de 100% ( $\lambda \geq 2$ ) et les vitesses sont mesurées. L'expérience met en évidence l'anisotropie de la vitesse des modes  $SH_0$  et  $S_0$  induite par la tension uniaxiale. Il apparaît de plus que ces vitesses évoluent de manière extrêmement non linéaires avec l'élongation. Ces observations peuvent être expliquées à l'aide de l'effet acousto-élastique [2]. Un modèle hyperélastique, où la loi de comportement dérive d'une fonction de densité d'énergie de déformation, est nécessaire pour rendre compte de cet effet. À faible élongation ( $\lambda \leq 1.1$ ), le modèle Neo-Hookeen (le plus simple) explique les évolutions de ces vitesses. Cependant, à plus grande élongation, un modèle plus sophistiqué impliquant le second invariant principal est nécessaire.

Finalement, les courbes de dispersion des modes « dans le plan » guidés dans un ruban mou sont aussi mesurées. Les courbes de dispersion théoriques de ces modes peuvent être calculées à l'aide de l'équation de Rayleigh-Lamb qui décrit les modes de plaques, à condition de remplacer l'épaisseur de la plaque par la largeur du ruban et la vitesse longitudinale par la vitesse de plaque [3]. En particulier, certains points de ces courbes de dispersions, qui dérivent directement des vitesses mesurées dans la plaque, évoluent conformément aux mesures précédentes, lorsque le ruban est étiré.

## Références

1. M. LANOY, F. LEMOULT, A. EDDI, AND C. PRADA, Dirac cones and chiral selection of elastic waves in a soft strip, *Proc Natl Acad Sci USA*, **117(48)**, 30186–30190 (2020).
2. Z. ABIZA, M. DESTRADE, AND R.W. OGDEN, Large acoustoelastic effect, *Wave Motion*, **49(2)**, 364–374 (2012).
3. J. LAURENT, D. ROYER, AND C. PRADA, In-plane backward and zero-group-velocity guided modes in rigid and soft strips, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **147**, 1302–1310 (2020).



**Figure 1.** Une plaque faite d'un matériau mou et quasi-incompressible, est mise sous tension uniaxiale. Les positions des points sont relevées et le gradient de déformation  $\mathbf{F}(\mathbf{X})$  est calculé et affiché à l'aide de vecteurs. La couleur code l'angle en degrés, entre le vecteur quasi-horizontale et le vecteur vertical :  $\arctan\left(\frac{F_{yx}}{F_{xx}}\right)$ . Ici, une force de 3.8kg (resp. 6.8kg) entraînent des elongations  $F_{xx} - 1$  de 35% (resp. 75%). Une ligne source génère des ondes élastiques guidées dans la plaque, et leurs vitesses de phase sont mesurées dans les deux directions principales.