

Acoutique physique – *Physical acoustics* –

PAR VINCENT LAUDE

Institut FEMTO-ST, département MN2S
équipe MINANO

« Micro-Instrumentation, NANosciences et Ondes »
32 avenue de l'Observatoire F-25044 Besançon

Email: `vincent.laude@femto-st.fr`

Toile: `http://members.femto-st.fr/vincent-laude/`

1 Introduction aux ondes élastiques

Qu'est ce qu'une onde ?

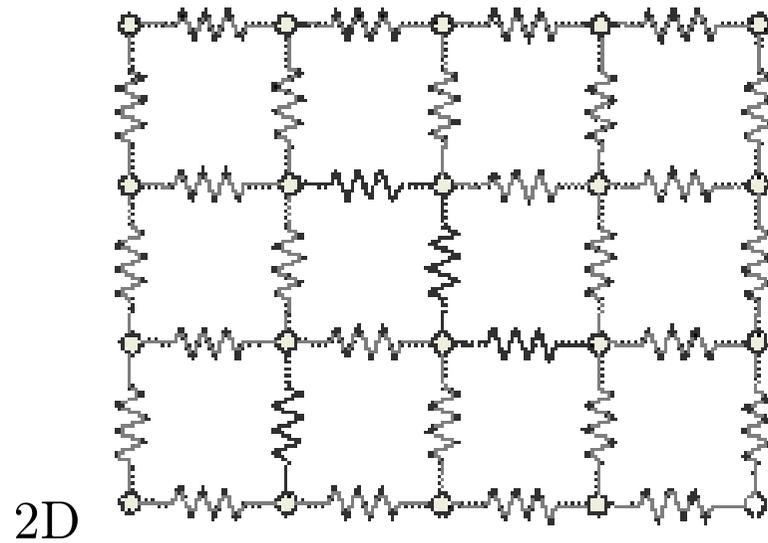
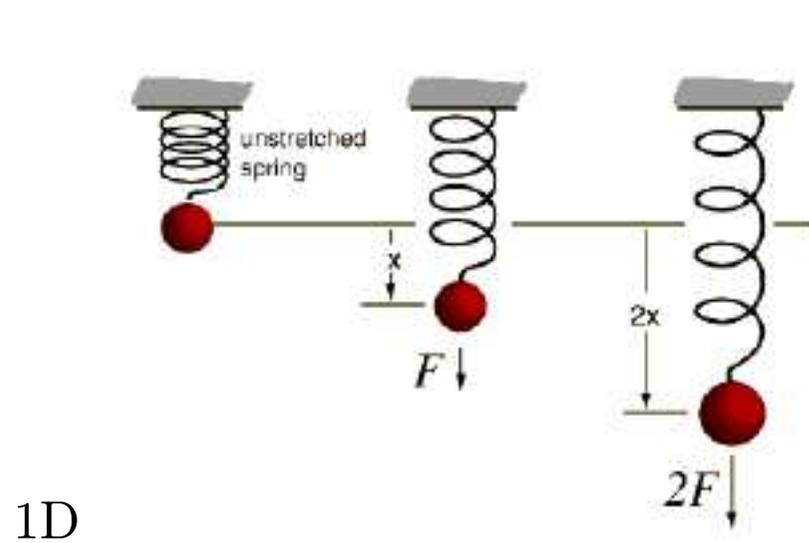
Plusieurs attitudes sont possibles pour définir ce concept relativement flou :

- **Réponse 1 (traitement du signal)** : c'est un modèle (mathématique) pour décrire la propagation d'un signal à longue distance au cours du temps. Peu importe ce que c'est vraiment, c'est l'information (le signal) porté par l'onde qui est importante.
- **Réponse 2 (mathématiques appliquées)** : une onde est une solution d'une équation d'onde, équation elliptique aux dérivées partielles en temps et espace. L'important est de déterminer les solutions de l'équation et leurs conditions d'existence.
- **Réponse 3 (physique)** : c'est une perturbation propagative de l'équilibre d'un milieu ou d'un matériau. Placé localement et temporairement hors d'équilibre, le milieu réagit pour revenir à l'état qu'il préfère : le repos ! La perturbation se propage de proche en proche. Le plus simple est de considérer que la perturbation est faible, donc que la réaction est élastique, et de négliger dans un premier temps les nonlinéarités.

Dans le cadre de ce cours, c'est l'attitude physique qui nous intéresse le plus, mais on ne peut négliger les deux autres !

2 Elasticité

Le modèle le plus simple du comportement élastique d'un milieu soumis à une déformation est celui du ressort.



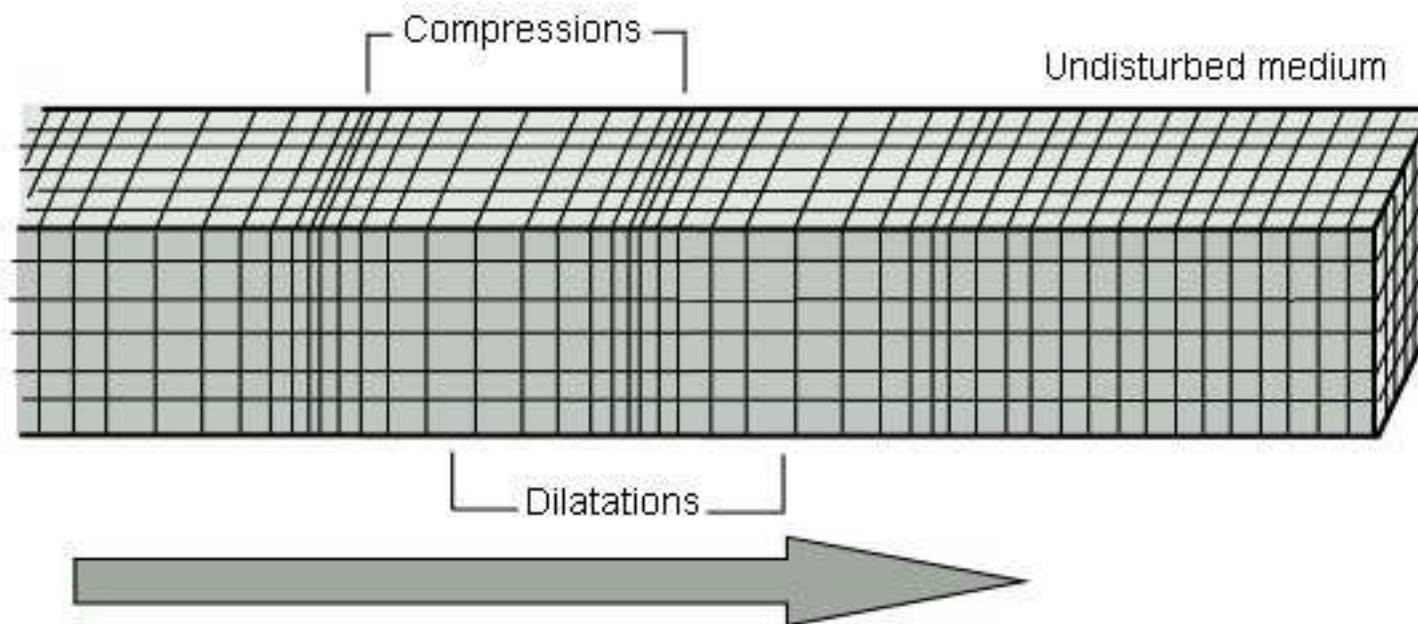
3 Quels sont les types d'ondes élastiques ?

3.1 Ondes longitudinales ou P (de pression)

Elles se propagent dans un milieu homogène : ce sont des ondes de volume.

Elles existent dans tous les milieux (fluides et solides). Ce sont des ondes de compression (la variation de surpression est liée à une variation de volume) ou encore des ondes de polarisation longitudinale.

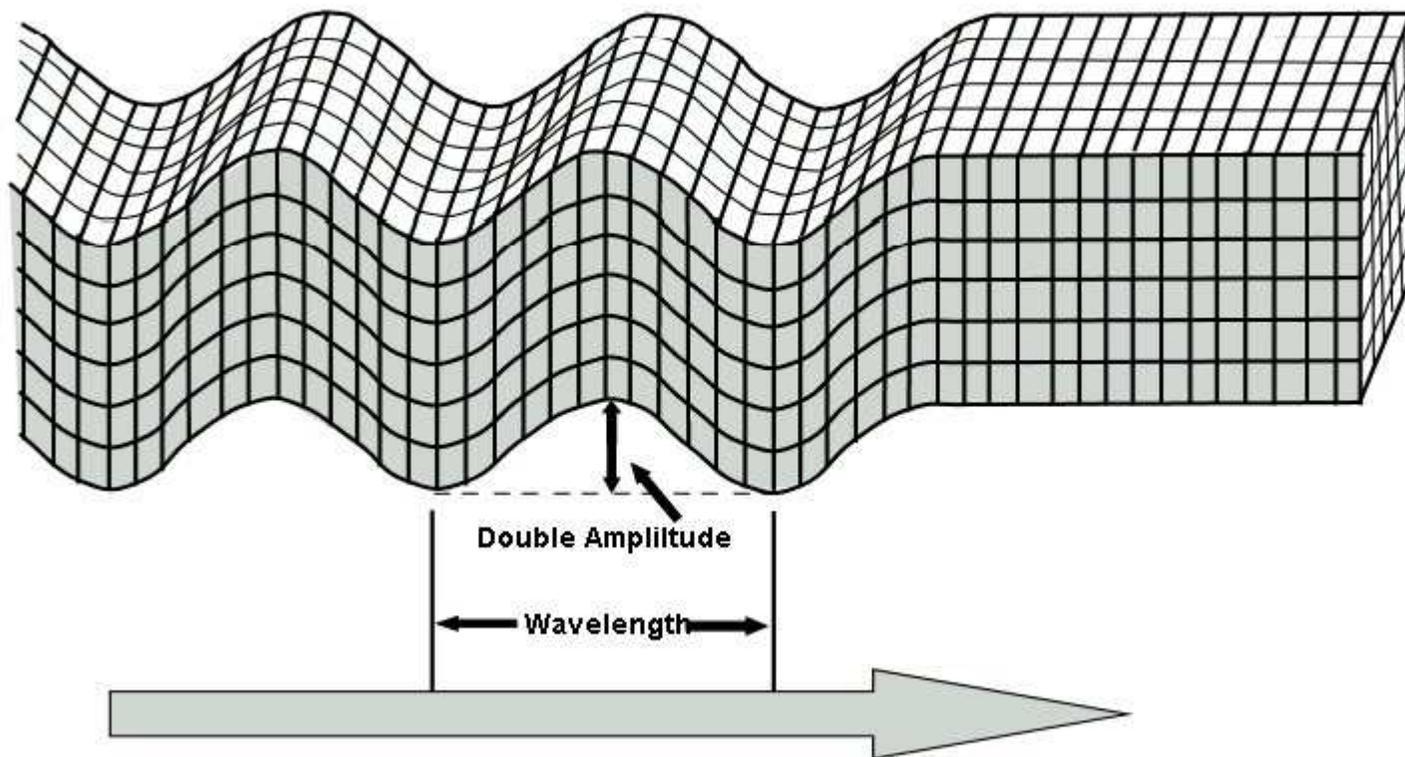
P Wave



3.2 Ondes transverses ou S (shear wave)

Elles se propagent dans un milieu homogène : ce sont des ondes de volume. Elles n'existent pas dans les fluides non visqueux (donc idéalement ni dans l'eau ni dans l'air). Il en existe toujours deux dans les solides, qui peuvent être dégénérées (même direction de propagation, même vitesse, mais polarisations orthogonales). Le déplacement n'est pas lié à une variation de volume.

S Wave



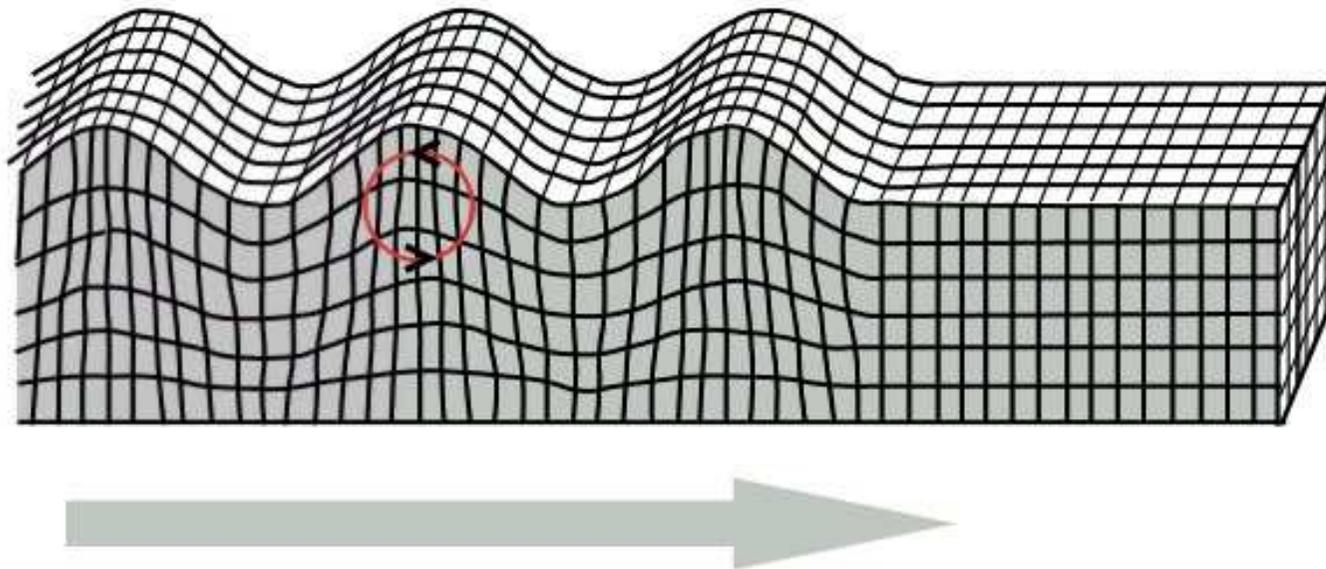
3.3 Ondes de surface de type Rayleigh ou R

Les ondes de surface se propagent à la surface d'un milieu ou à l'interface entre deux milieux (ondes d'interface).

Elles existent dans les fluides, notamment dans l'eau (par exemple les vagues !) et aussi dans les solides. La polarisation (les déplacements) est (majoritairement) elliptique. Le déplacement est lié à une variation de volume.

L'amplitude des déplacements décroît exponentiellement dans la profondeur.

Rayleigh Wave



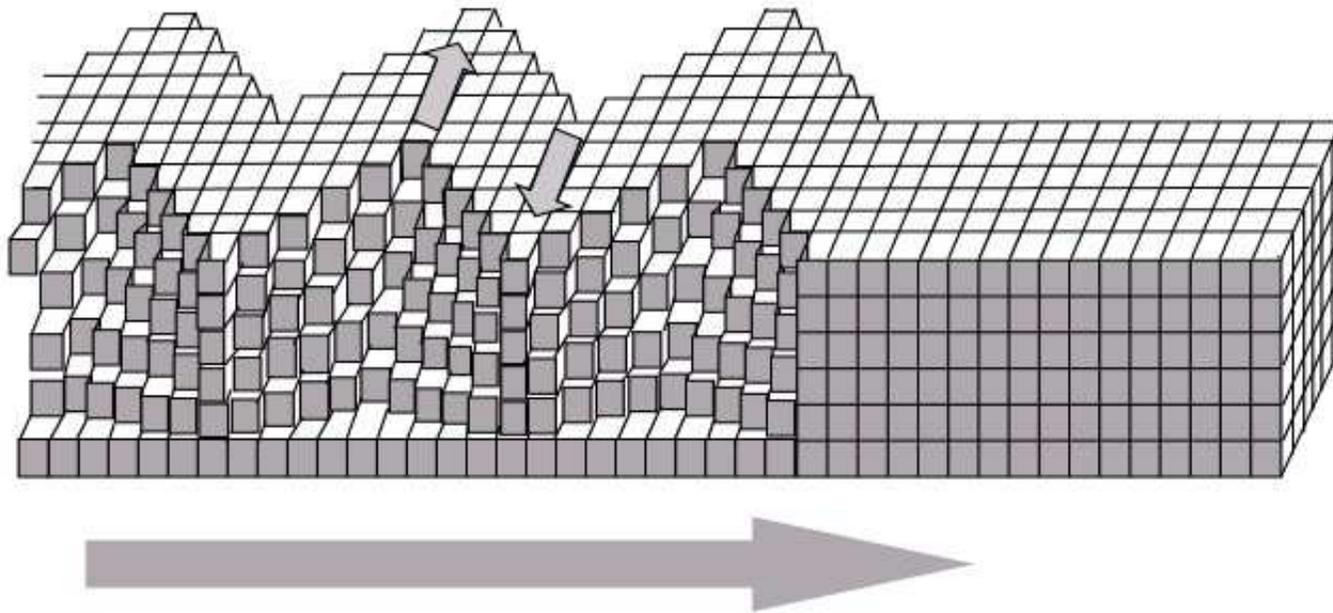
3.4 Ondes de surface de polarisation transverse

Elles se propagent à la surface d'un milieu ou à l'interface entre deux milieux (ondes d'interface).

On parle d'onde de Love en sismologie (ce qui désigne un mode de polarisation transverse d'un substrat composite en ultrasonique). La polarisation est purement transverse. Le déplacement n'est pas lié à une variation de volume.

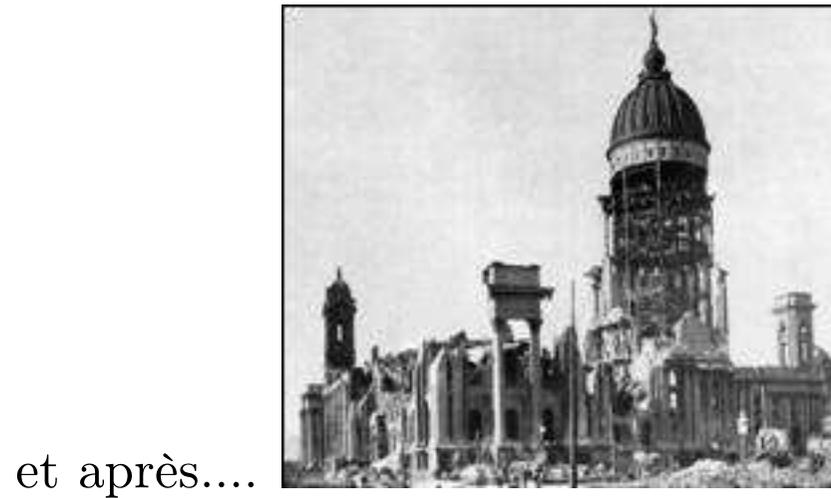
L'amplitude des déplacements décroît exponentiellement dans la profondeur.

Love Wave

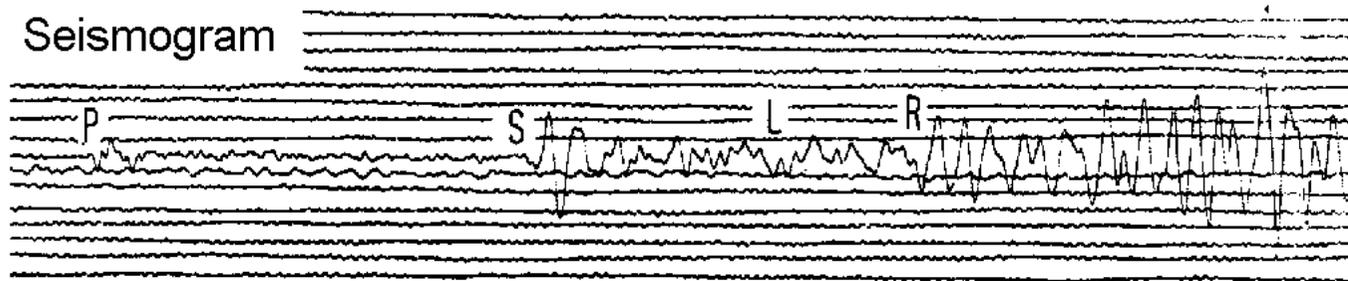


4 Tremblements de terre

En séismologie, on étudie les ondes élastiques se propageant dans l'écorce terrestre. Les ondes transverses (de cisaillement) créent les plus gros dégâts...



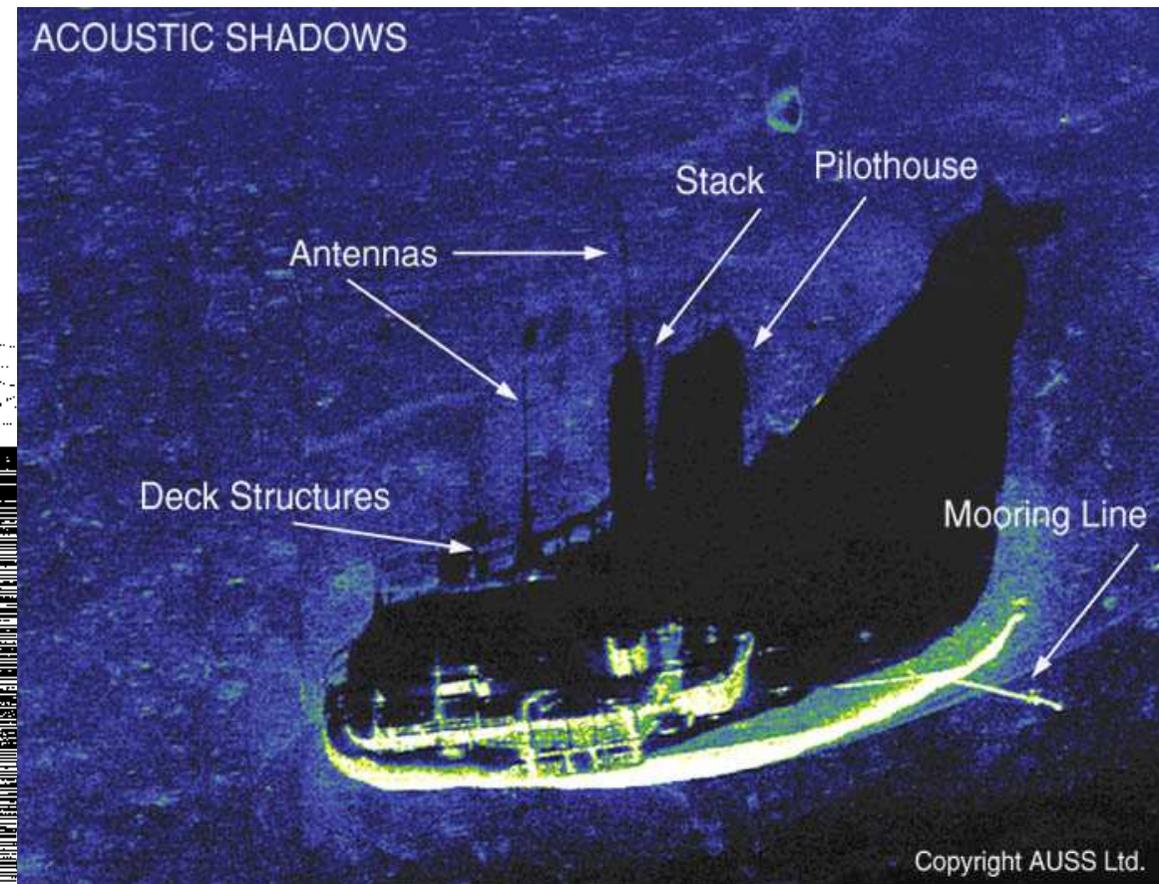
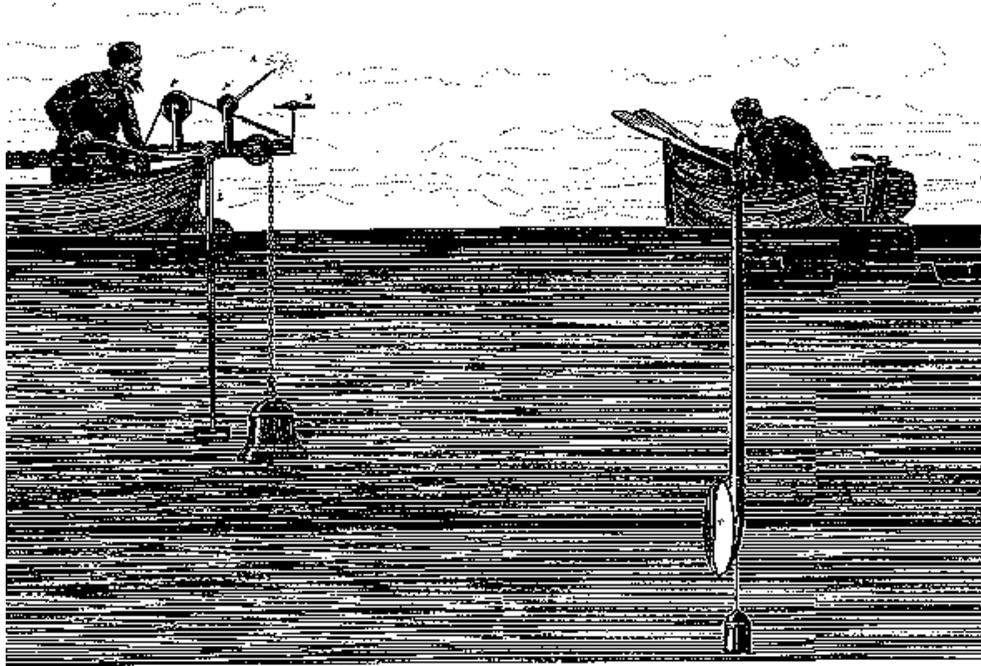
Séismogramme montrant quatre types d'ondes successives



5 Applications des ondes dans les fluides ?

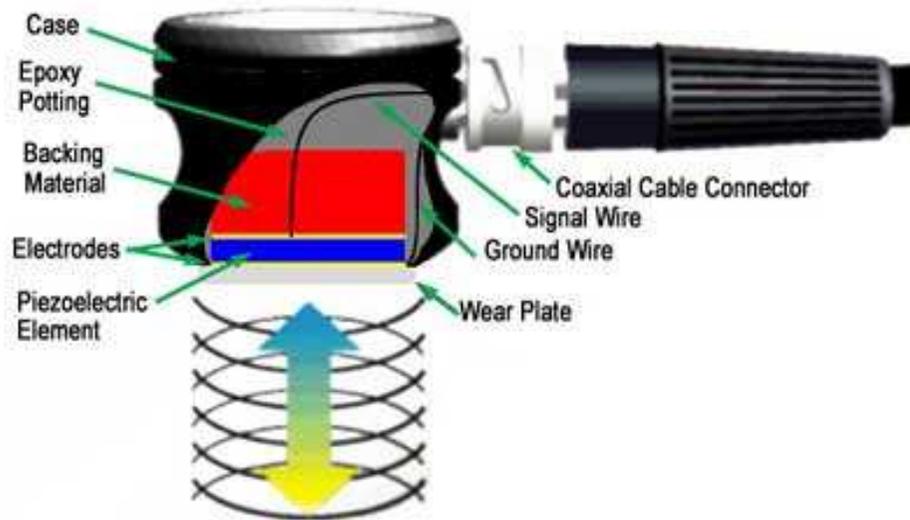
5.1 Le sonar

Le sonar est une technique apparentée au Radar pour la détection sous-marine. Il utilise des fréquences acoustiques relativement basses, ce qui limite la résolution spatiale mais augmente la portée.



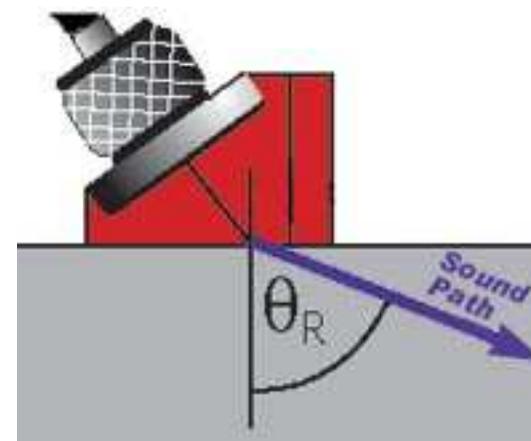
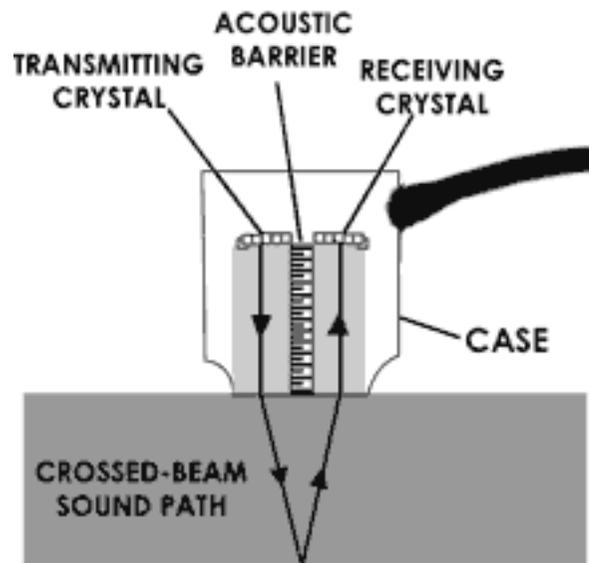
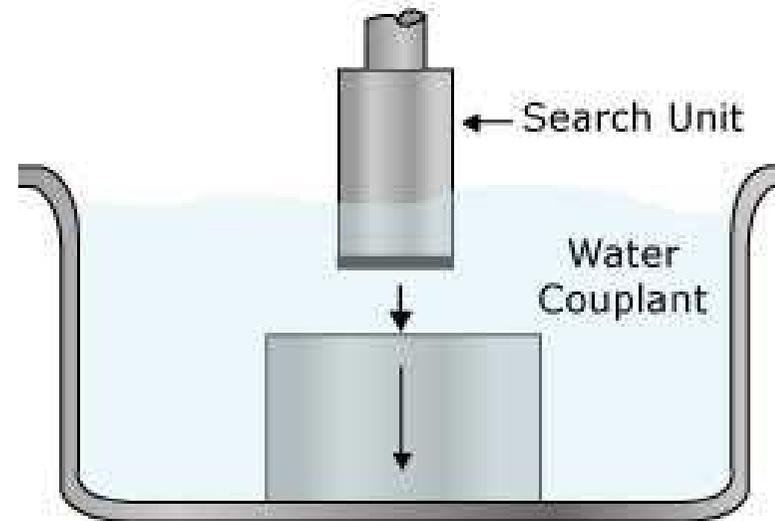
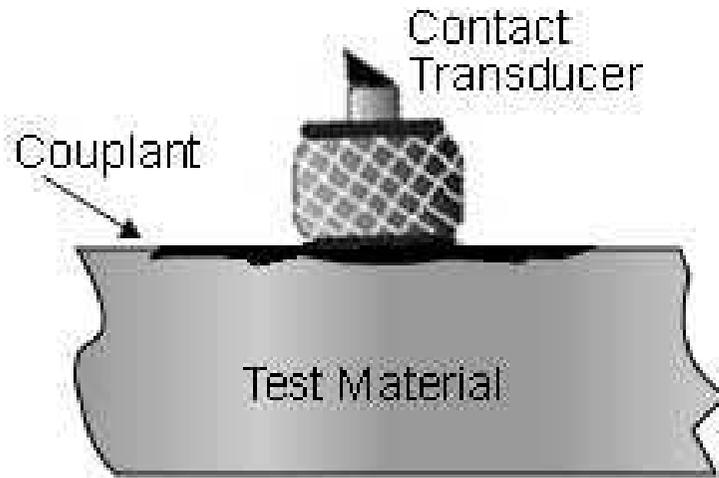
5.2 Echographie médicale

Le corps humain ressemble beaucoup à l'eau du point de vue de ses propriétés acoustiques. Les ondes ultrasonores (ultrasonore = de fréquence plus élevée que les fréquences audibles par l'oreille humaine) sont utilisées pour faire des images de l'intérieur du corps ou des organes.



6 Applications des ondes dans les solides ?

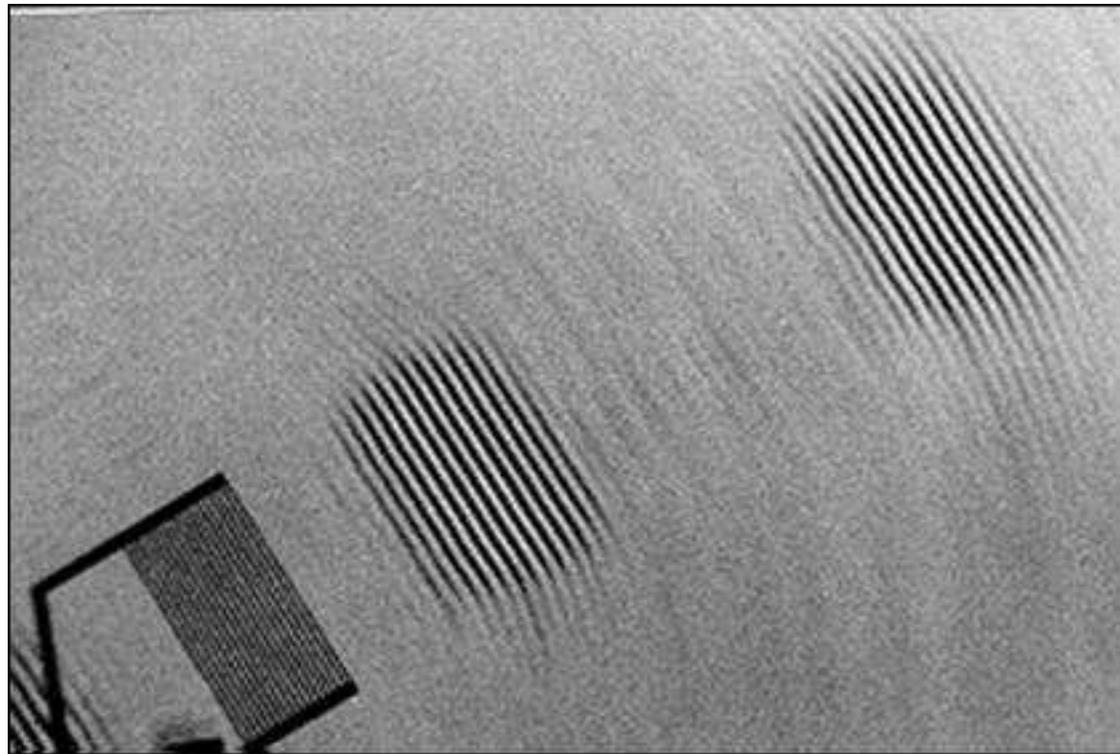
6.1 Contrôle non destructif



6.2 Ondes élastiques de surface (surface acoustic waves)

Il y a actuellement des filtres à ondes de surface dans tous les téléphones portables (plusieurs dans le même téléphone) ! Ces filtres sont fabriqués sur des substrats piézoélectriques de quartz, tantalate de lithium ou autres.

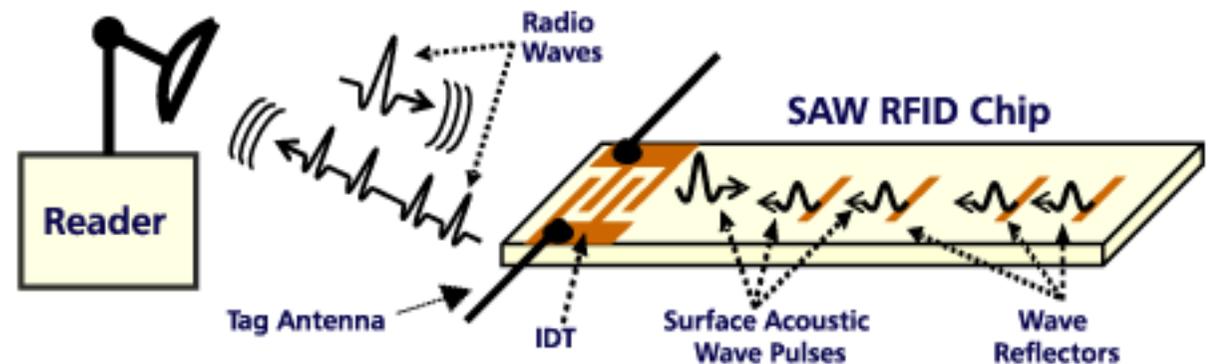
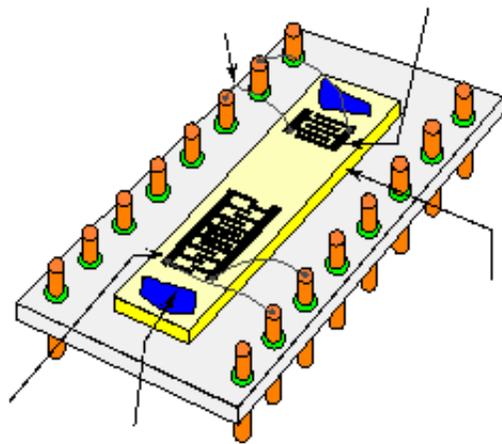
Les ondes sont générées directement à la surface par des peignes interdigités métalliques, dont la périodicité est de l'ordre du micron. Les fréquences des filtres vont de 50 MHz (télévision) à 2.5 GHz (filtres UMTS).



6.3 Capteurs à ondes de surface

Les ondes de surface sont très sensibles à tout corps étranger venant perturber les conditions locales de propagation sur la surface. Elles sont également sensibles aux perturbations physiques : température, pression ou contraintes, etc. De ce fait, les dispositifs à ondes de surface permettent la réalisation de capteurs très sensibles, potentiellement interrogeables à distance.

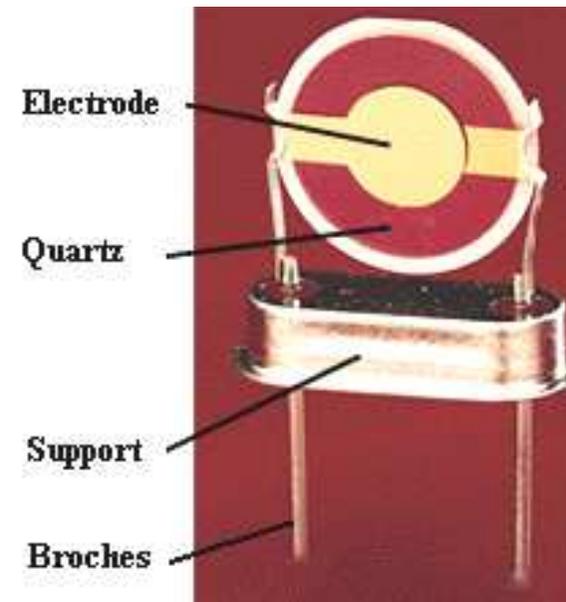
Ces propriétés s'étendent aux modes de plaques ou aux dispositifs à films minces.



6.4 Résonateurs à ondes de volume

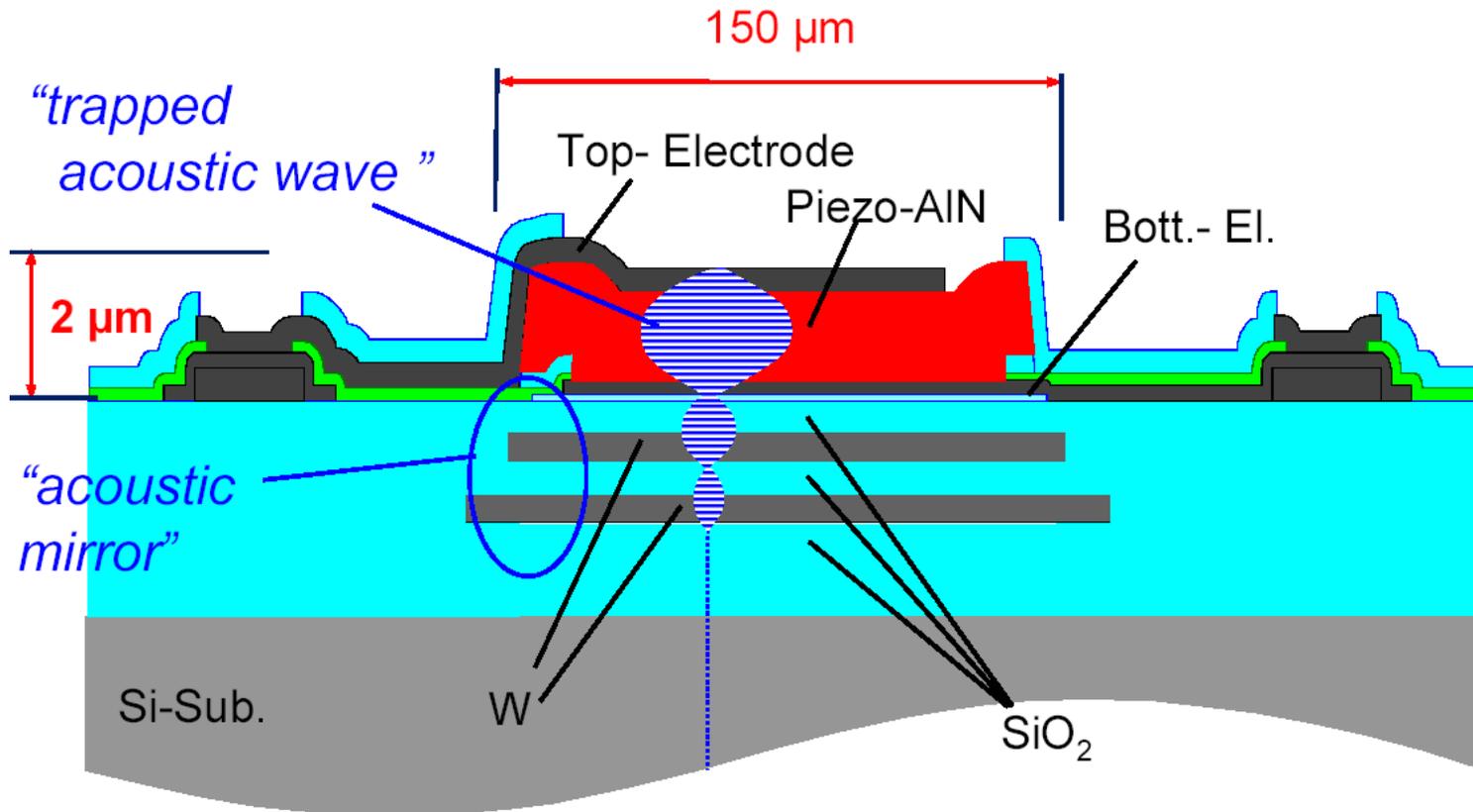
Il existe de nombreux types de résonateurs utilisant des ondes de volume, ou plus généralement des modes acoustiques, d'un mono-cristal. Entre tous les matériaux, les mono-cristaux présentent les atténuations les plus faibles. Il est ainsi possible d'emmagasinier de l'énergie élastique pendant un grand nombre d'oscillations de l'onde, ce qui permet de définir des fréquences très pures. Le comptage à une fréquence déterminée permet la réalisation d'une horloge, donc la mesure du temps. C'est le principe des quartz de l'horlogerie.

Les fréquences utilisées vont de qq 10 kHz à qq 100 MHz.



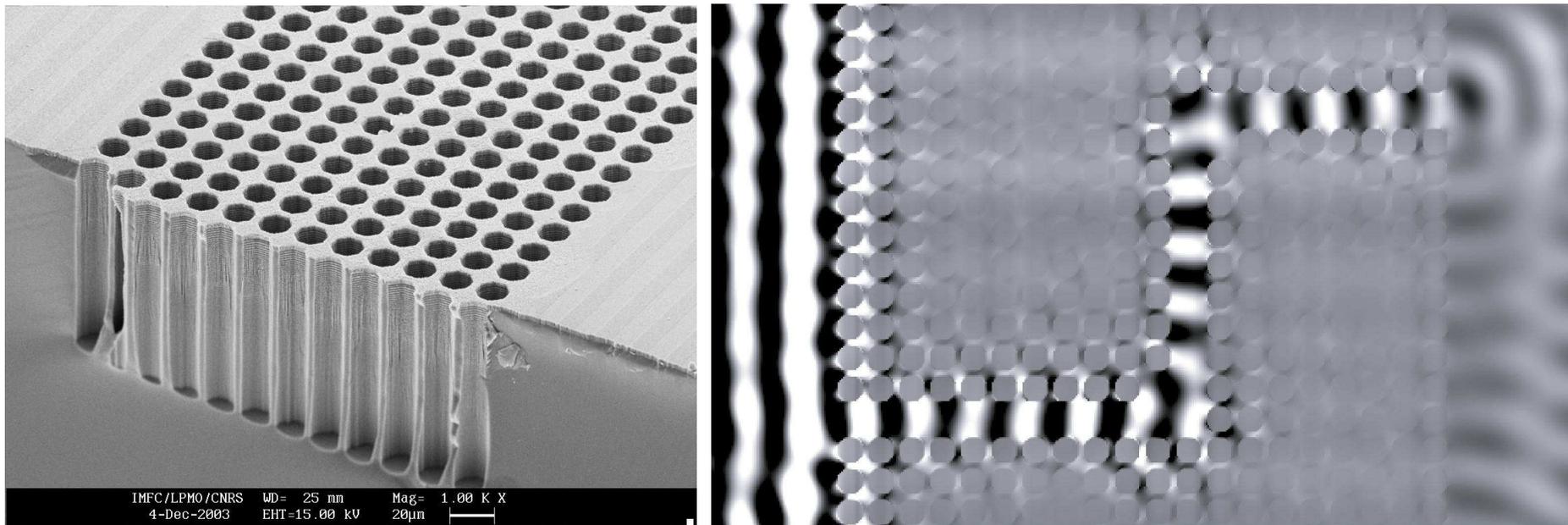
6.5 Résonateurs à films minces (FBAR)

Les FBAR (film bulk acoustic resonators) sont des résonateurs à ondes de volume utilisant des couches piézoélectriques dont l'épaisseur est de l'ordre du micron. Ils présentent plus de pertes que les résonateurs mono-cristallins, mais les fréquences de fonctionnement sont bien plus élevées (1 à 5 GHz). Ils concurrencent les filtres à ondes de surface.



6.6 Cristaux phononiques

Les cristaux phononiques sont des structures périodiques composites à 1D, 2D ou 3D, analogues aux cristaux photoniques de l'optique/électromagnétisme. Un grand contraste d'indice permet d'obtenir des bandes interdites totales, c'est-à-dire la possibilité de réfléchir dans une certaine gamme de fréquence toute onde quelle que soit sa polarisation ou son incidence.



7 Plan du cours

1. Introduction

2. Ondes acoustiques

Exercices

3. Cristaux, tenseurs, élasticité et piézoélectricité (résumé)

4. Ondes planes dans les solides

Exercices

5. Ondes guidées

Modes de plaque

Guides d'onde

Ondes de surface

6. Sur ordinateur : Simulation par éléments finis de dispositifs acoustiques

A vous de jouer !