

# Etude, réalisation et caractérisation de résonateurs à ondes élastiques de surface - Application à un capteur de température et de pression -

Ali Soltani<sup>1</sup>, Abdelkrim Talbi<sup>2</sup>, Jean-Claude Tricot<sup>2</sup>, H. Happy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IEEA, USTL Cité scientifique 59650 Villeneuve d'Ascq

<sup>2</sup> Département EEA, Ecole Centrale de Lille, Cité scientifique 59650 Villeneuve d'Ascq

## Introduction

Les capteurs utilisant la technologie des ondes élastiques de surface sont en pleine expansion depuis plus d'une décennie et sont utilisés dans de nombreuses applications domestiques, médicales, industrielles ou militaires. Ces capteurs permettent la mesure de différentes grandeurs physiques pression, température, vitesse, débit etc... [1]. Ces derniers sont également utilisés pour la détection des éléments chimiques dans ces milieux liquides ou gazeux.

Ces composants passifs peuvent être intégrés sans l'ajout d'éléments dans des plateformes d'instrumentation interrogeable sans fil nécessaire dans bons nombres d'applications.

Ce capteur se présente sous la forme d'un résonateur mécanique à ondes de surface (désigné par l'abréviation SAW pour *Surface Acoustic Wave*). Ces résonateurs sont réalisés à partir d'électrodes métalliques interdigitées en surface d'un matériau piézoélectrique dont le rôle est de convertir un signal électrique en vibration mécanique. La fréquence de résonance du composant est déterminée par les propriétés élastiques du matériau et le design du transducteur.

L'étude pratique se déroule en 3 étapes : Suite à une brève présentation de la cristallographie des matériaux, de la nature des ondes mécaniques, de leur propagation et leur génération, les capteurs sont ensuite réalisés en centrale de technologie. Deux matériaux piézoélectriques sont utilisés à titre comparatif : le quartz et le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ). Un accent est porté sur l'effet de l'anisotropie cristalline des matériaux sur la propagation des modes de Rayleigh via les performances du résonateur. Les paramètres à étudier sont la fréquence de résonance, le couplage électromécanique, le coefficient de fréquence en température et en pression.

## I. Généralités sur les ondes élastiques de surface

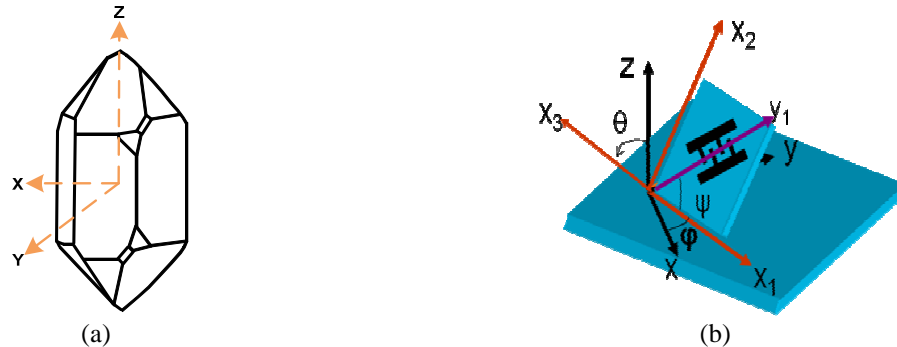
Les ondes élastiques se propagent dans tout milieu matériel : fluide, solide homogène ou inhomogène, isotrope ou anisotrope. L'atténuation des ondes est d'autant plus marquée que le milieu de propagation est désordonné. Ainsi, un solide amorphe ou polycristallin donne lieu à des pertes plus élevées que dans le cas d'un monocristal.

Les ondes d'intérêt dans ce travail sont des ondes élastiques guidées lesquelles sont confinées dans un espace parfaitement défini (en surface ou en volume) de façon à en minimiser les pertes et à cibler une ou plusieurs bandes spectrales désirées.

Ce concept a été largement utilisé dans l'industrie des télécommunications pour réaliser des lignes à retard disposées dans les chaînes d'émission-réception des systèmes de transmission d'images en analogique et entre autres, comme filtre dans les chaînes d'émission-réception en téléphonie mobile. Ces dispositifs utilisent des matériaux qui permettent la conversion d'une onde électrique à une onde élastique et vice-versa. Cette double fonction est obtenue à partir de matériaux piézoélectriques en cristal ou en couche mince à moindre coût comme le quartz, le niobate de lithium ou l'oxyde de zinc.

Chacun de ces matériaux présentent une cristallographie donnée caractérisée par leur anisotropie laquelle va définir la génération ou non d'une onde élastique.

Il existe 4 principaux types d'ondes élastiques : les ondes dites longitudinales dont le déplacement est parallèle à la direction de propagation de l'énergie (Poynting) ; les ondes transverses (de volume ou de surface) dont le déplacement est perpendiculaire au vecteur de Poynting ; les ondes de Rayleigh (en surface) composées de deux composantes de déplacement (une transversale et l'autre longitudinale) et les ondes dites de Love lesquelles se composent d'une onde transverse confinée dans une couche dont l'épaisseur est sub-longueur d'onde et de vitesse de propagation inférieure à celle du substrat. D'autre part, en raison de l'anisotropie des certains cristaux, certaines directions sont plus favorables que d'autres à la propagation d'un type d'onde. Par exemple, la coupe ST du quartz (cf. figure 1a-b) ( $\varphi=0$ ,  $\theta=132^\circ$ ) suivant la direction de propagation  $\psi$  (figure 1b) est favorable à la génération du mode de Rayleigh.



**Figure 1 :** (a) Représentation du cristal de quartz suivant l'axe xyz et (b) représentation d'une coupe cristallographique suivant les angles d'Euler.

## II. Equation fondamentale de la dynamique

Les équations qui régissent la propagation des ondes élastiques dans les solides sont les suivantes:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} + e_{kij} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_j \partial x_k} \quad (1)$$

$$e_{jkl} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} - \epsilon_{jk} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_j \partial x_k} = 0 \quad (2)$$

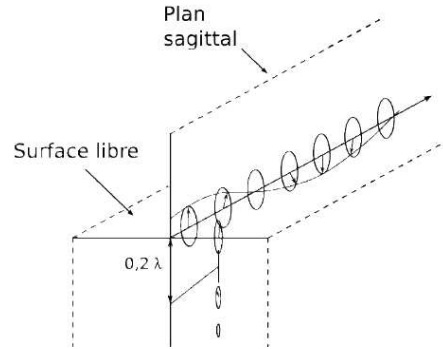
$\rho$ ,  $c_{ijkl}$ ,  $e_{jkl}$ , et  $\epsilon_{jk}$  correspondent respectivement à la densité volumique, aux constantes élastiques, aux constantes piézoélectriques et aux constantes diélectriques du cristal. La solution générale est une combinaison linéaire des ondes partielles suivantes :

$$u_i = u_i^0 e^{j\omega(t - \frac{n_i x_l}{v})} \quad (3) \quad \text{pour le déplacement mécanique,}$$

$$\Phi = \Phi^0 e^{j\omega(t - \frac{n_i x_l}{v})} \quad (4) \quad \text{pour le potentiel électrique.}$$

Avec  $n_i$ ,  $x_l$  et  $v$  correspondant respectivement aux cosinus directeur, la position spatiale du plan d'onde et la vitesse de cette dernière.

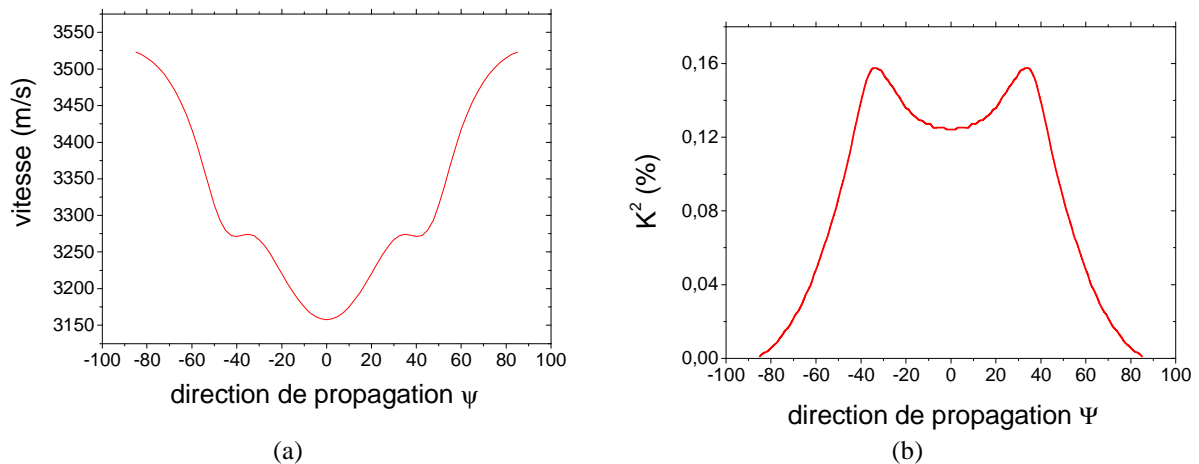
La résolution de ces équations associées à des conditions aux limites spécifiques va permettre de déterminer la nature du mode de propagation. Dans le cas du mode de Rayleigh, l'onde évanescence suivant la profondeur, présente une polarisation elliptique dans le plan sagittal comme représenté sur la figure 2.



**Figure 2 :** Représentation de la propagation de l’onde de Rayleigh dans le plan sagittal.

Les principales caractéristiques de ces modes sont la vitesse de propagation, le coefficient de couplage électromécanique.

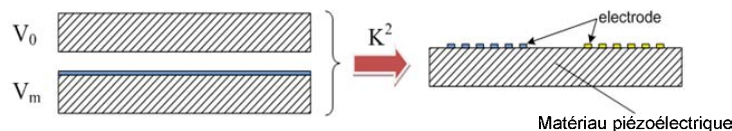
La vitesse de propagation est déterminée par la résolution de l’équation fondamentale de la dynamique associée aux conditions aux limites (contraintes mécaniques libres en surface du matériau et continuité du déplacement et du potentiel électrique). Ce calcul (Figure 3a) est réalisé dans le cas du quartz suivant la coupe ST avec une direction de propagation variable à l’aide d’un code de calcul développé sous MATLAB.



**Figure 3:** (a) Evolution théorique de la vitesse de phase de l’onde et (b) du coefficient de couplage électromécanique en fonction de la direction de propagation  $\psi$ .

Ce résultat permet de mettre en évidence les lieux angulaires d’intérêt  $\psi_{\text{intéret}}$  où l’énergie et l’onde se propage dans le même sens. Ces points correspondent aux extremums de cette courbe ( $dv/d\psi=0$ ).

Le coefficient de couplage électromécanique  $K^2$  est déterminé par la relation suivante :  $K^2 = (V_0^2 - V_m^2) / V_0^2$  où  $V_0$  et  $V_m$  correspondent respectivement à la vitesse de phase définie à la condition de potentiel libre et nulle en surface du matériau tel représenté sur la figure 4.



**Figure 4:** Représentation schématique pour le calcul du coefficient  $K^2$ .

La conversion énergie électrique en énergie mécanique et inversement est obtenue pour des valeurs de  $K^2$  les plus élevées. La figure 3b permet de déterminer les directions de propagation permettant de maximaliser ce coefficient en corrélation avec les angles d’intérêt  $\psi_{\text{intéret}}$  où le flux d’énergie est maximum.

Dans le cas des applications télécoms, il est impératif de minimiser l'influence des perturbations extérieures sur les performances du dispositif électro-acoustique alors qu'il faut accentuer cette sensibilité dans le cas des capteurs laquelle se traduit par une modification des pertes et/ou de la vitesse de propagation de l'onde. Par exemple, un capteur de pression nécessite une sensibilité aux contraintes mécaniques avec une moindre dérive vis-à-vis de la température.

### III. Principe de génération des ondes de surface

La génération d'ondes élastiques de surface se fait au moyen de transducteurs interdigités métalliques (cf. figure 5). La longueur d'onde est définie par la période géométrique du transducteur et permet de déterminer la fréquence de fonctionnement du dispositif.

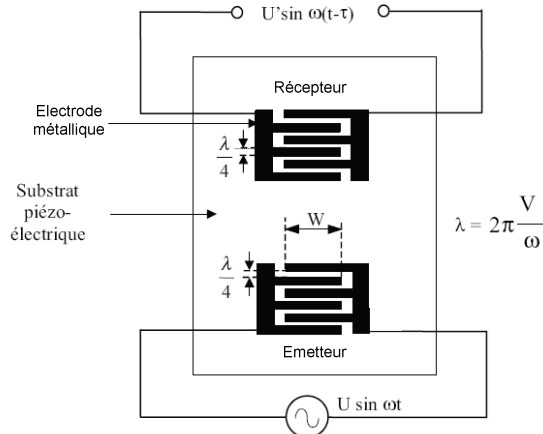


Figure 5: Vue de dessus du design du transducteur à électrodes interdigitées.

#### III.1 Les matériaux piézoélectriques

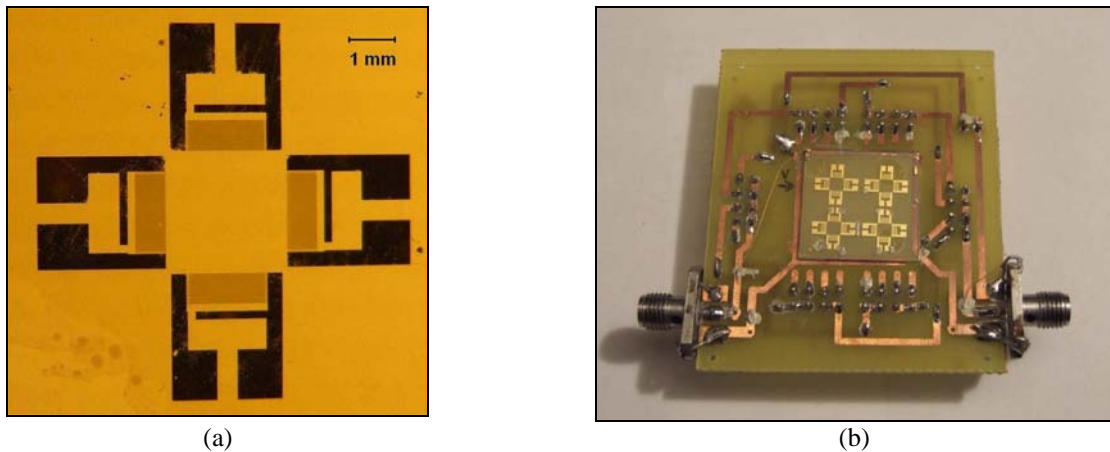
Le quartz et le niobate de lithium sont des matériaux piézoélectriques largement utilisés dans les dispositifs électro-acoustiques pour des propriétés spécifiques qui leur sont propres :

- Certaines coupes cristallines du quartz présentent une excellente stabilité en température,
- Certaines coupes cristallines du niobate de lithium présentent un coefficient de couplage électromécanique particulièrement élevé.

Dans le cadre de cette étude, le quartz est donc utilisé pour réaliser un capteur de pression intrinsèquement compensé en température avec un substrat découpé suivant la coupe ST. Quant au niobate de lithium, il peut être utilisé pour réaliser un capteur en température basé sur la coupe Y (42°) (cette étude reste identiquement la même que pour le quartz).

#### III.2 Procédé technologique de fabrication du composant

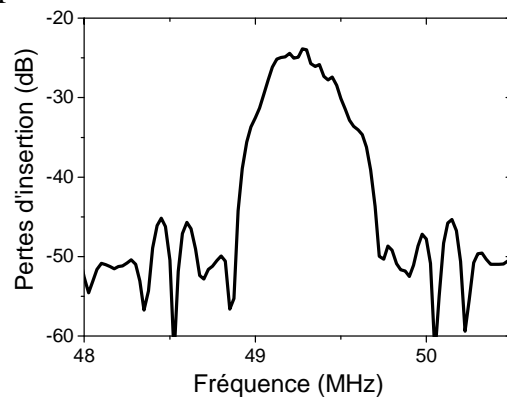
La technologie est réalisée suivant les procédés standards de la microélectronique en salle blanche. La première étape consiste à nettoyer le substrat avec de l'acétone puis à l'isopropanol de manière à éliminer toutes les traces de résidus organiques entre autres. La seconde étape correspond à déposer par évaporation une couche métallique en aluminium ou en Ti/Au sur une résine optique type AZ et de réaliser les électrodes interdigitées ainsi que les plots d'épaissement par un procédé de lift-off. Une vue du dessus du composant réalisé est présentée figure 6a. Ces composants sont ensuite montés sur une plaque de circuit imprimé permettant leurs tests électriques une fois les interconnexions réalisées par thermo-compression (figure 6b).



**Figure 6 :** (a) Vue de dessus d'un capteur à onde acoustique réalisée en salle blanche et (b) monté sur sa plaquette de mesure.

#### IV. Caractérisation des filtres

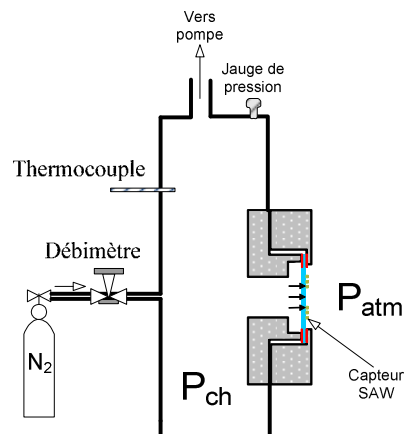
La mesure est obtenue sur un dispositif réalisé sur un substrat de quartz de  $600\mu\text{m}$  d'épaisseur (coupe ST, propagation suivant l'axe x) avec une longueur d'onde de  $64\mu\text{m}$ . La figure 7 montre la mesure du paramètre  $S_{21}$  réalisé à l'analyseur de réseau Agilent HP 8753C. La fréquence de fonctionnement est de l'ordre de  $49.25\text{MHz}$ , ce qui correspond à une vitesse de propagation de  $3152\text{m}$  en parfait accord avec la théorie.



**Figure 7:** Mesure expérimentale du paramètre  $S_{21}$  d'un capteur à quartz.

#### Etude de la sensibilité du composant en fonction de la température et de la pression.

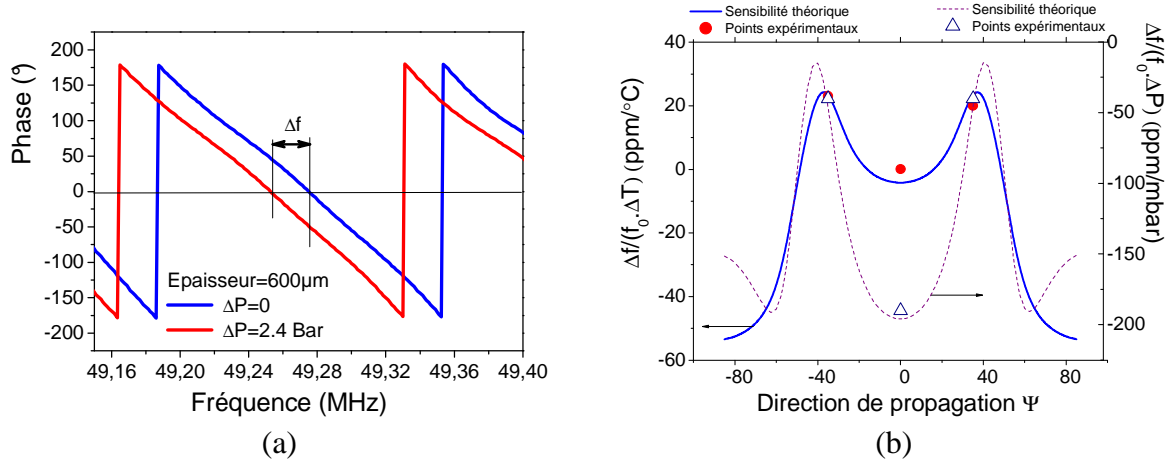
Le principe de la mesure consiste en un filtre disposé dans une chambre ayant une régulation en pression (cf. figure 8). Ce montage permet de mesurer in-situ l'évolution de la fréquence propre du capteur en fonction de la pression appliquée sur le substrat, lequel joue le rôle d'une membrane de  $1\text{cm}$  de diamètre en limite de la chambre.



**Figure 8:** Représentation schématique de la chambre de mesure du capteur de pression.

Pour l'étude en température, un élément Pelletier est utilisé et permet d'obtenir des variations de température de plus de 80°C.

La phase du paramètre  $S_{21}$  mesuré est montrée figure 9a pour une variation de pression donnée par rapport à la pression atmosphérique (et pour une température fixe). A une fréquence de fonctionnement dans la bande passante, un décalage de la phase de 50° est observé pour une variation de pression de 2.4bar.



**Figure 9:** (a) Evolution expérimentale de la phase en fonction de la fréquence pour 2 variations de pression dans la chambre et (b) évolution théorique et expérimentale de la sensibilité en pression et en température d'un capteur à quartz en fonction de la direction de propagation  $\psi$  de l'onde dans le cristal.

Cette expérience peut être reproduite pour différentes directions de propagation dans la coupe ST du quartz afin de quantifier l'effet de l'anisotropie du matériau cristallin sur la sensibilité par rapport à la température ainsi qu'à la pression (cf. figure 9b).

Les résultats expérimentaux sont reportés sur la figure 9b et montrent un bon accord avec les sensibilités théoriques. Cette étude permet de mettre en exergue l'intérêt de la coupe ST avec une direction de propagation suivant l'axe x laquelle est nettement favorable à la réalisation de capteur de pression. En effet dans ce cas, la sensibilité à la pression est de l'ordre de 190 ppm/°C alors que le coefficient de température au premier ordre est pratiquement compensé.

## Conclusion

L'objet de cette étude est la réalisation d'un capteur d'une grandeur physique (de température ou de pression) avec un dispositif à onde élastique de surface. Cela nécessite une compréhension des phénomènes physiques liés à la propagation des ondes élastiques dans les matériaux piézoélectriques notamment l'effet de l'anisotropie cristallographique de ces matériaux. Il a été mis en évidence la dépendance de la vitesse de propagation avec la pression et la température de manière à déterminer les orientations cristallographiques optimales en vue de la réalisation expérimentale d'un capteur de pression ou de température. Cette étude constitue aussi première approche permettant d'appréhender les différentes étapes de la fabrication d'un microcapteur du matériau jusqu'à son intégration dans un système de mesure.

## Référence

[1] Thèse de Abdelkrim Talbi, Université Henri Poincaré - Nancy I (2003).