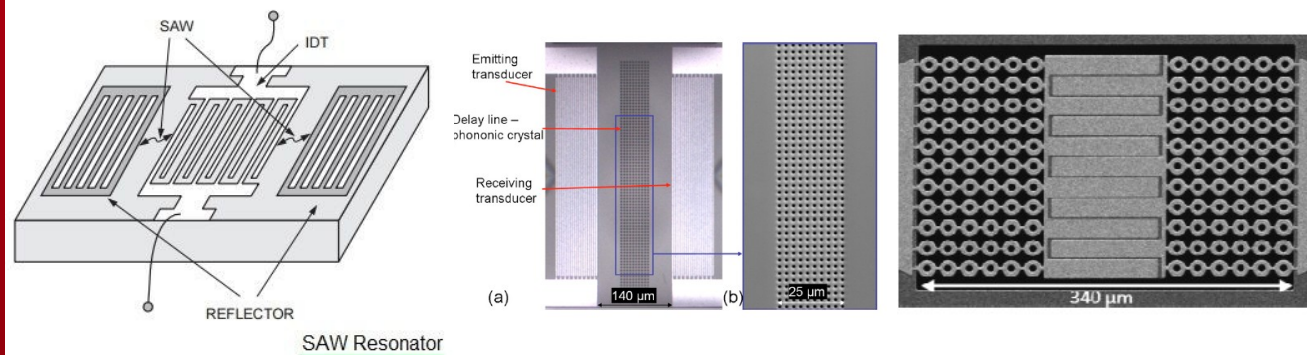


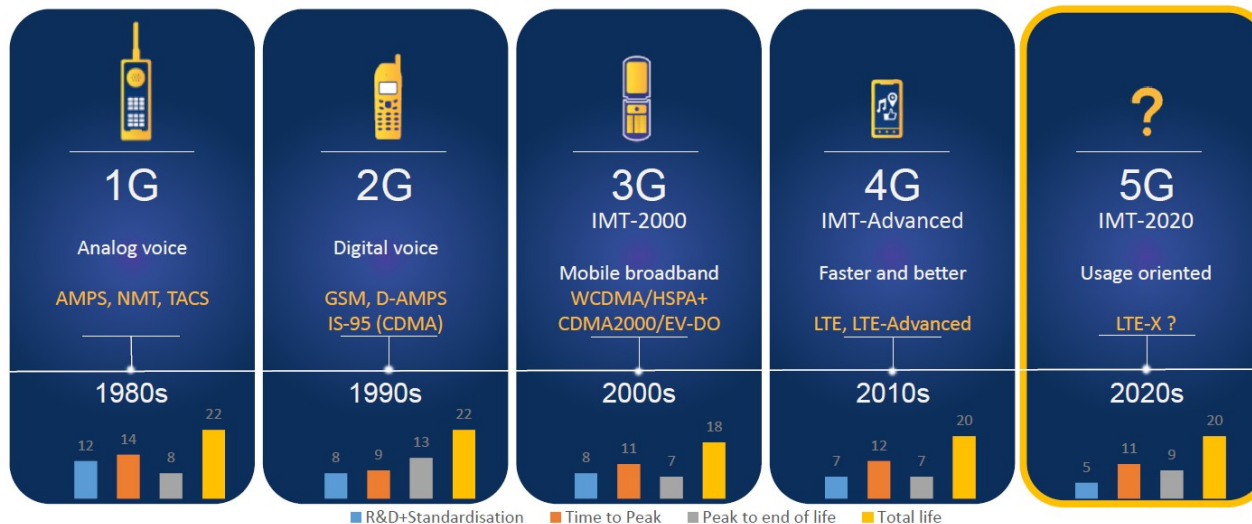
MÉTAMATÉRIAUX ACOUSTIQUES POUR LES APPLICATIONS RADIOFRÉQUENCES : BESOINS, RÉALISATIONS ET PERSPECTIVES

Réunion de lancement du GdR META | A. Reinhardt | 22/01/16



CONTEXTE

- Evolution des systèmes de télécommunication sans fil



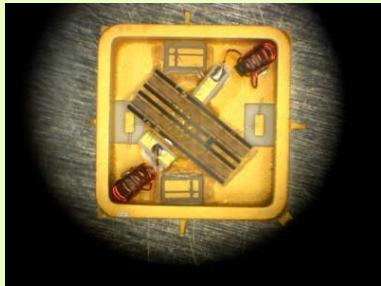
Source : CLA Direct

- Internet des objets
 - Objets connectés
 - Réseaux de capteurs

COMPOSANTS ACOUSTIQUES POUR LA RF

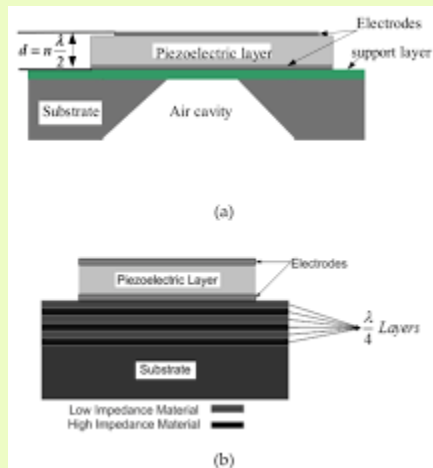
- Éléments clé d'un système d'émission / réception radio

Filtres à ondes acoustiques de surface (SAW)

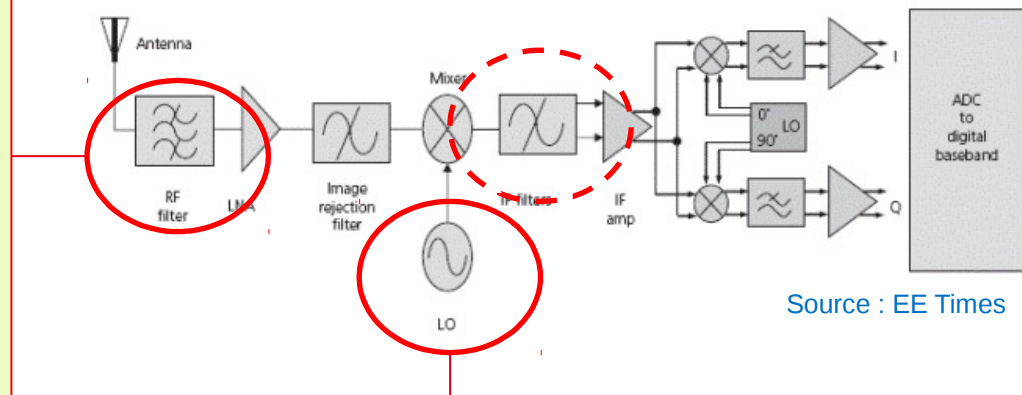


Source : Phonon Corp.

Filtres à ondes acoustiques de volume (BAW)

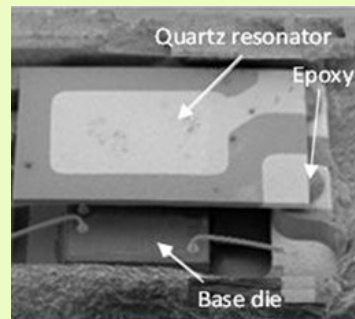


Source : M. Beghi, *Modeling and measurement methods for acoustic waves and for acoustic microdevices* (2013)



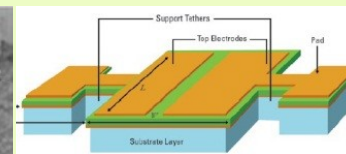
Source : EE Times

Résonateurs à quartz



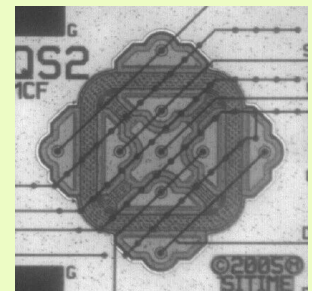
Source : Silicon-Labs

Résonateurs piézoélectriques



Source : EE Times

Résonateurs Si

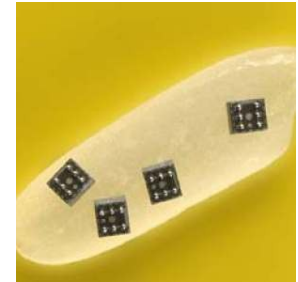


Source : SiTime

PRÉ-REQUIS

- Spécificité des composants acoustiques

- Compacité ($< 0,2 \text{ mm}^3$)
- Caractère passif
- Coefficients de qualité élevés ($Q > 400$)



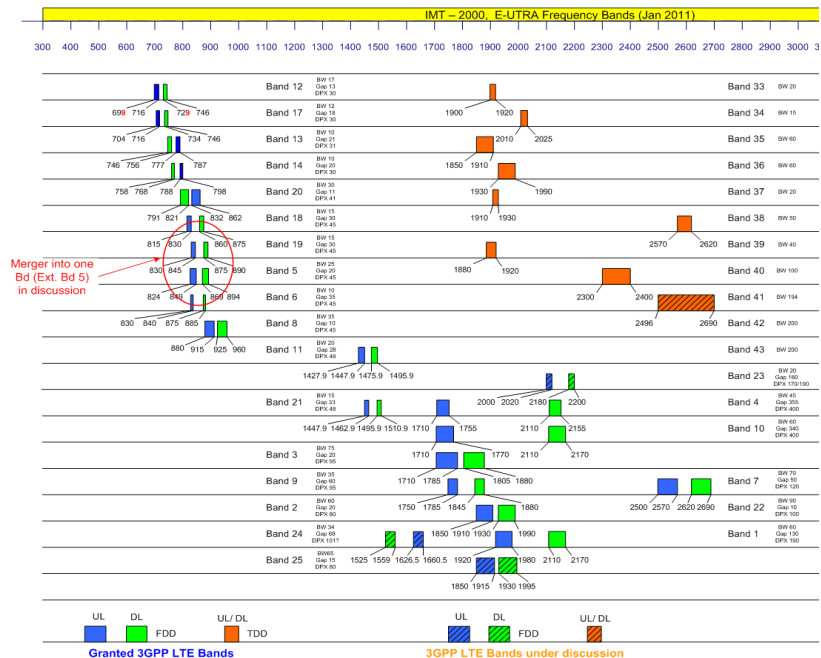
Source : Avago Tech.

- De plus en plus :

- Faibles pertes ($Q > 2000$ ou pertes d'insertion $< 2 \text{ dB}$)
- Faible dérive en température ($< 30 \text{ ppm/K}$, voire $< 10 \text{ ppm/K}$)
- Tenue en puissance (10 W crête)
- Linéarité

- Moteurs de développement :

- Antennes MIMO
- Agrégation de spectre
- Coexistence de multiples bandes
- Co-design filtres + amplificateurs



- Usages existants des métamatériaux en acoustique RF
- Démonstrations de fonctions inspirées de la RF
- Problématiques à adresser
- Quelle place pour les métamatériaux ?

USAGES EXISTANTS DES MÉTAMATÉRIAUX EN ACOUSTIQUE RF

- **Excitation d'ondes de surface par (un grand nombre d') électrodes interdigitées**

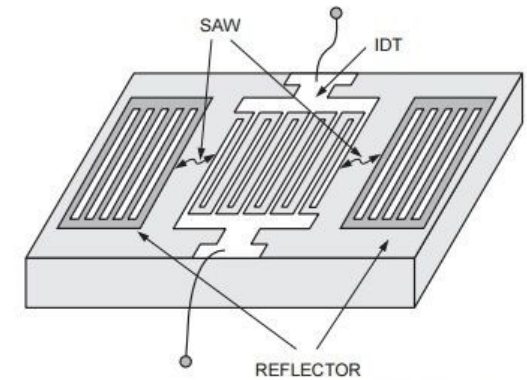
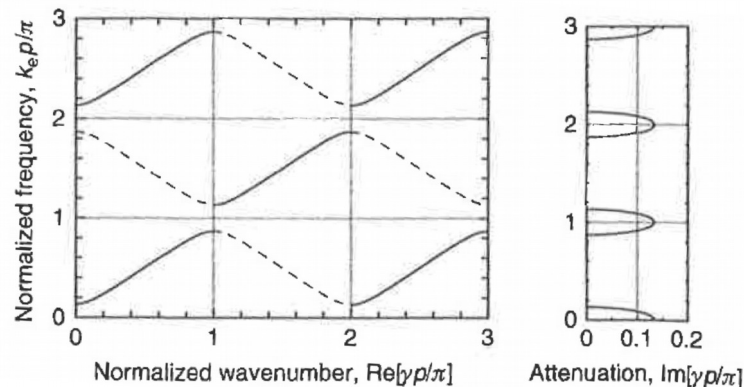
- Propagation en milieu périodique

→ Approximations de **milieu effectif**

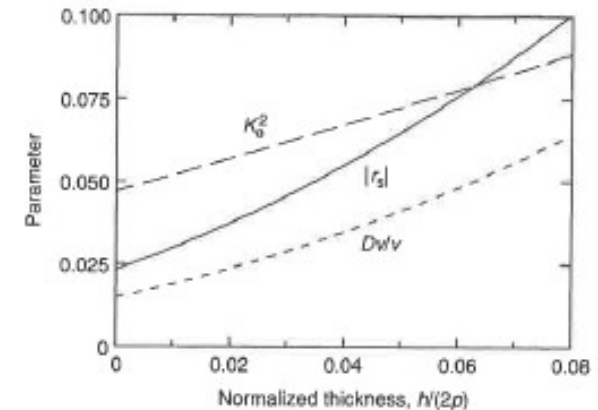
- Conditions de propagation des ondes dépendantes de la géométrie du réseau d'électrodes

→ **Bandes d'arrêt**

- Utiliser pour former des cavités résonantes

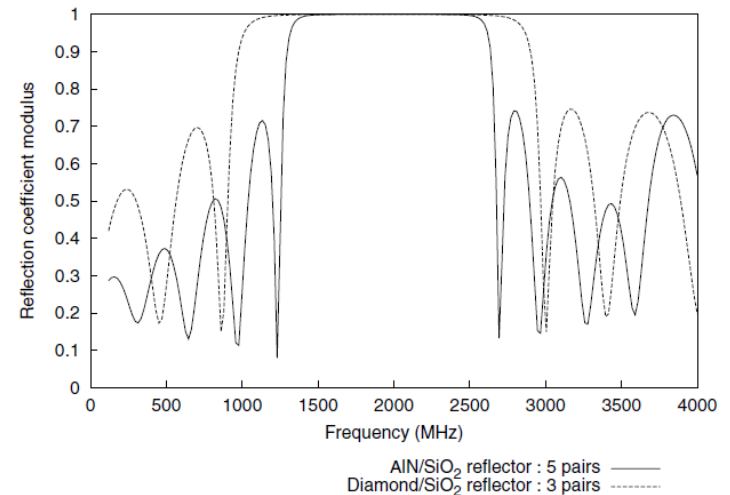
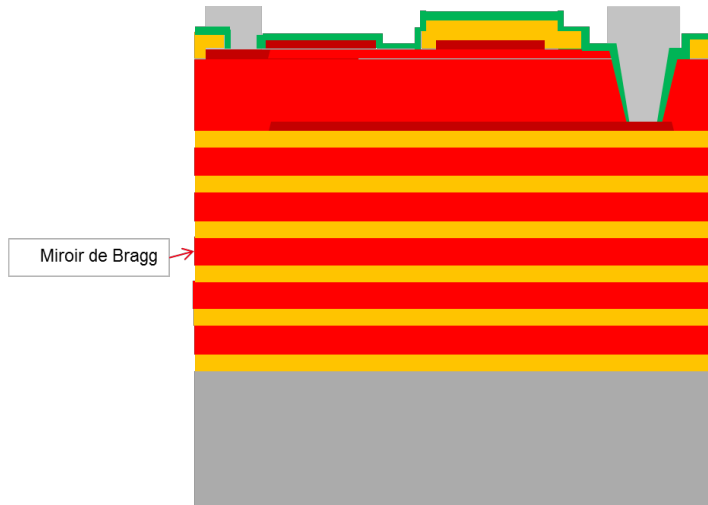


SAW Resonator



D. Morgan, *Surface acoustic wave filters*, Academic Press, 2007

- Résonateurs SMR (*Solidly Mounted Resonators*):
 - Isolation acoustique par miroir de Bragg
 - Empilement couches basse et haute impédance acoustique
 - Milieu quasi-périodique
 - Exploitation d'une bande d'arrêt

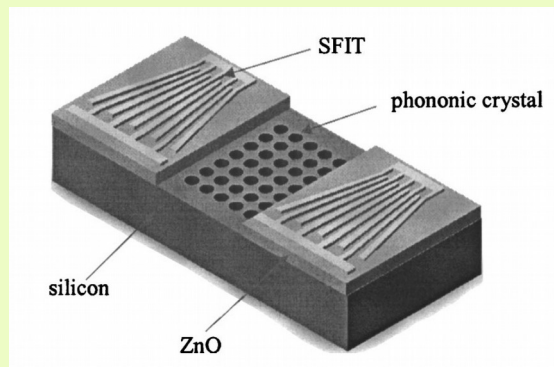


Reinhardt, Ultrasonics Symposium 2002

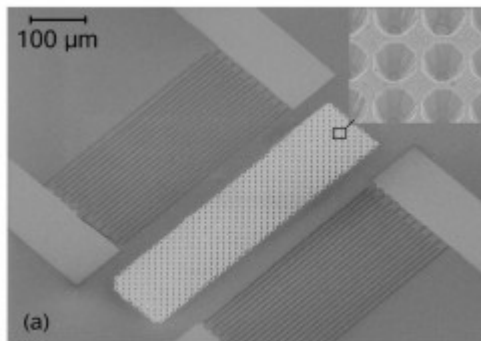
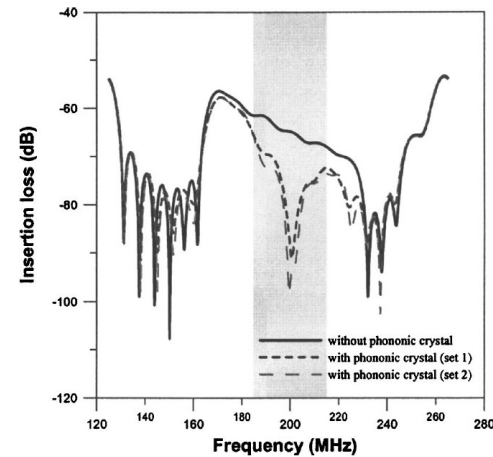
DÉMONSTRATIONS DE FONCTIONS INSPIRÉES DE LA RF

PREUVES DE CONCEPT

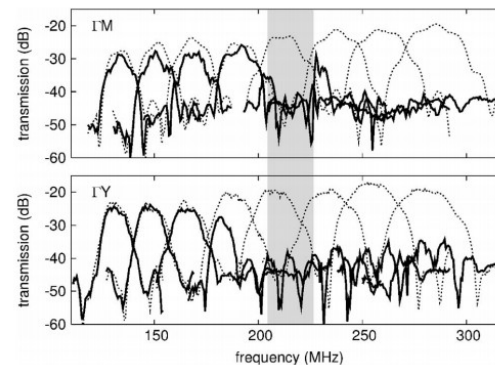
- Réalisation de cristaux phononiques aux fréquences RF
 - Pour les ondes de surface



Wu, J. Appl. Phys. 97, 094916 (2005)

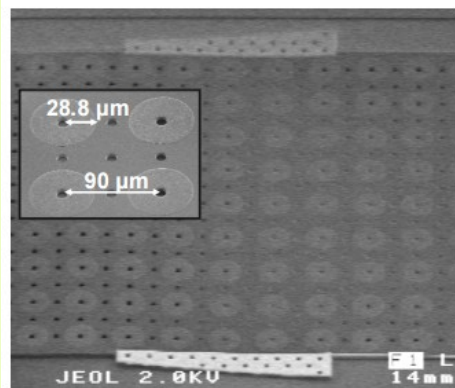


Benchabane, Phys. Rev. E 73, 065601 (2006)

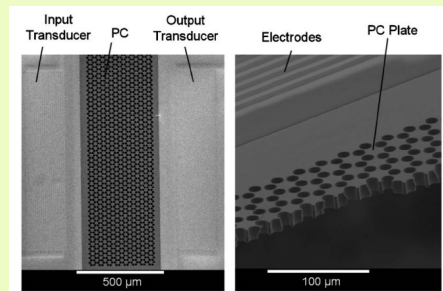
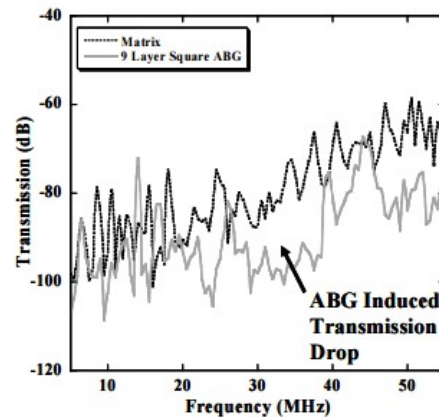


PREUVES DE CONCEPT

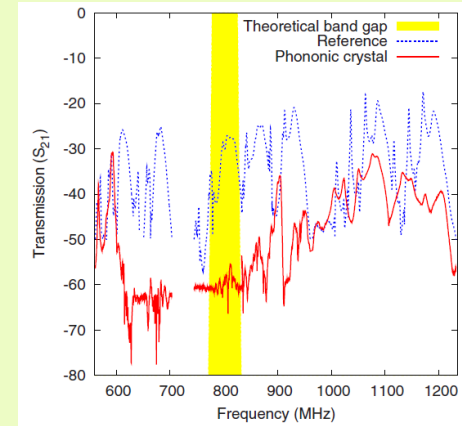
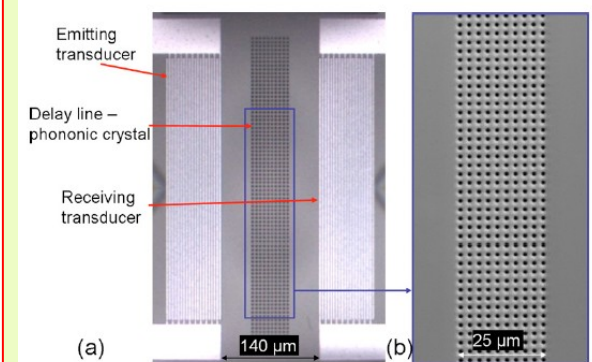
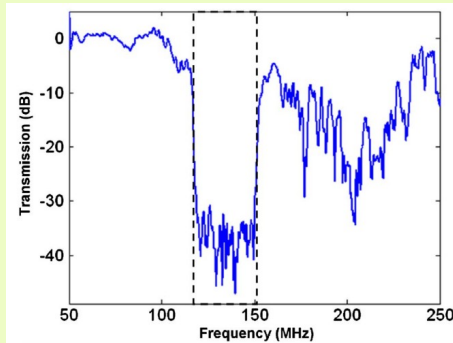
- Réalisation de cristaux phononiques aux fréquences RF
 - Pour les ondes de plaque



Olsson, Transducers 2007



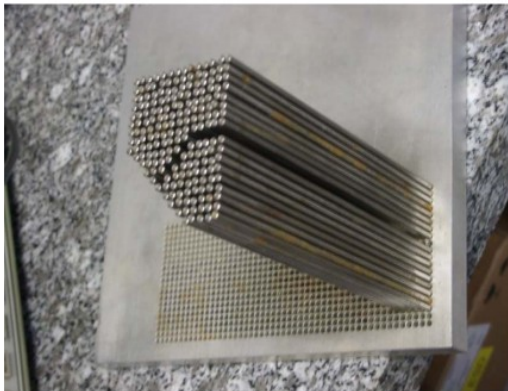
Mohammadi, APL 92, 221905 (2008)



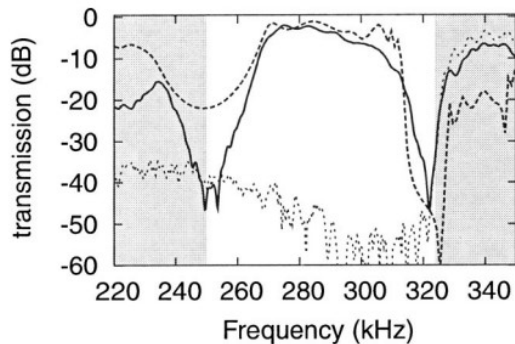
Gorisse, APL 98, 234103 (2011)

GUIDES D'ONDES PHONONIQUES

- Guidage par un défaut

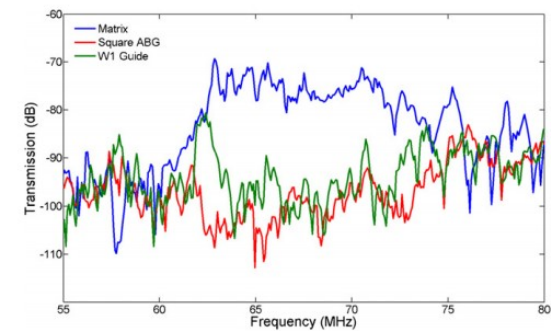
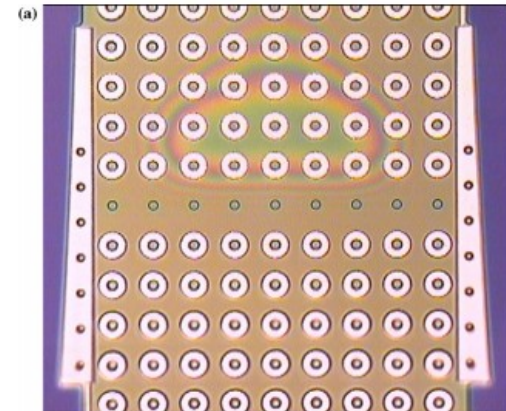
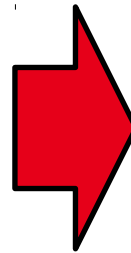
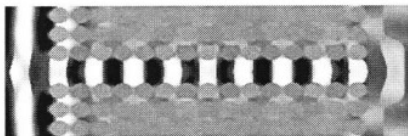


Khelif, Ultrasonics 2004



Khelif, APL 84, 4400 (2004)

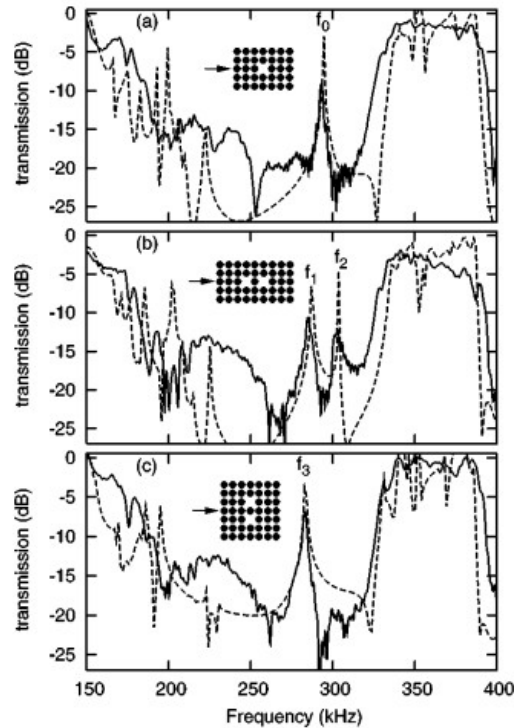
(a)



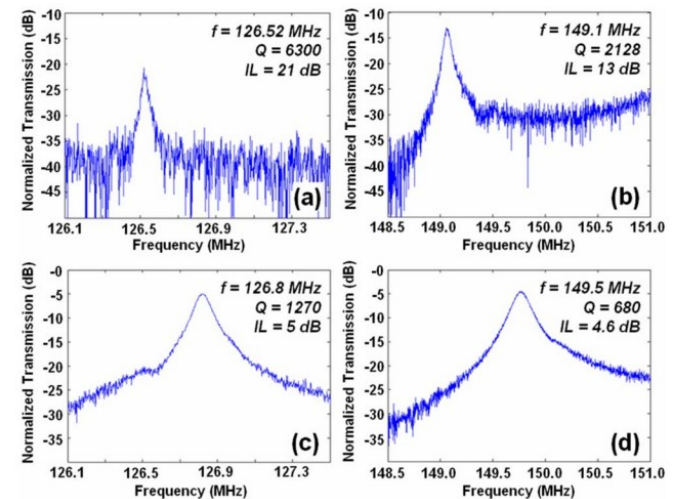
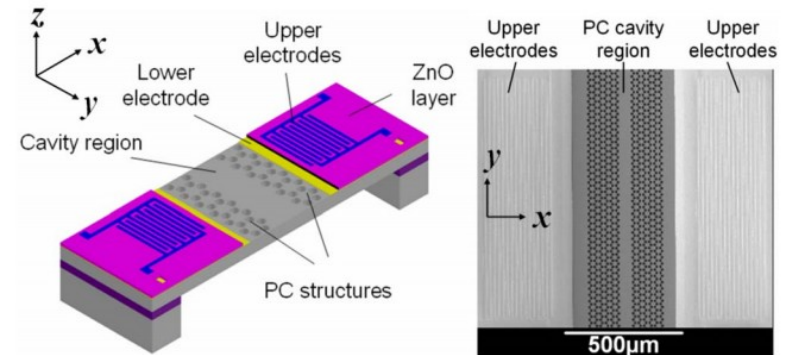
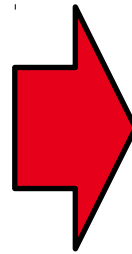
Olsson, Sensors & Actuators A 145-146 (2008)

CAVITÉS RÉSONANTES

- Formation de résonances localisées



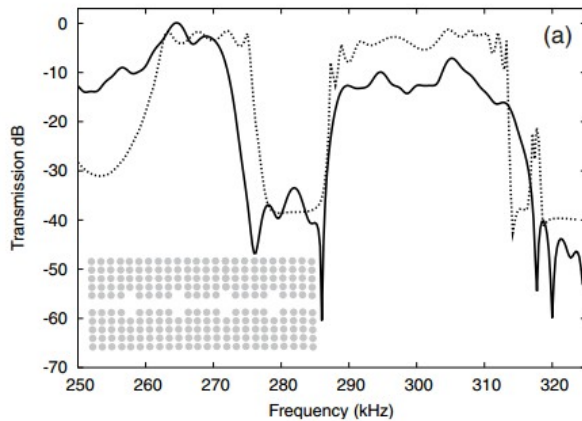
Khelif, PRB 86, 214301 (2003)



Mohammadi, APL 94, 051906 (2009)

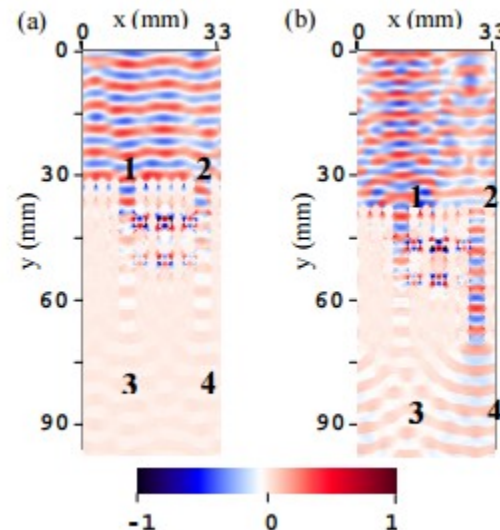
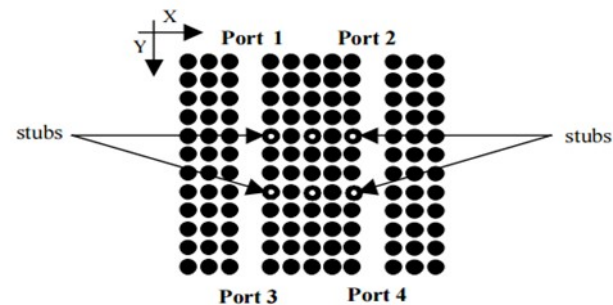
INSERTION DE « STUBS »

- Filtrage

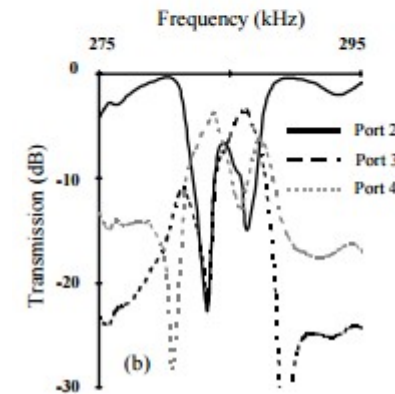
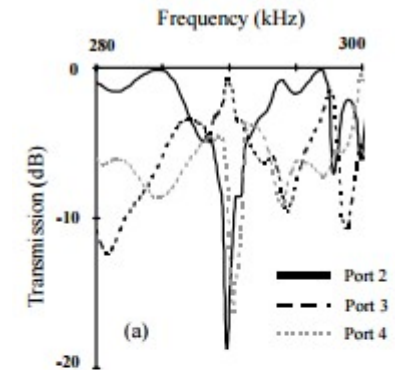


Benchabane, Europhysics Letters 71, 570 (2005)

- Demultiplexage



Penneec, Ultrasonics 2005

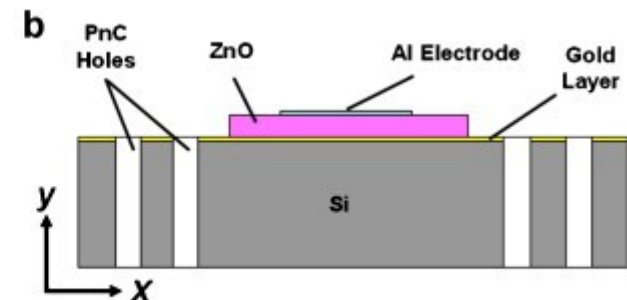
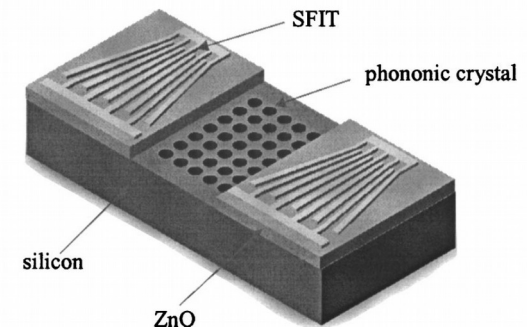
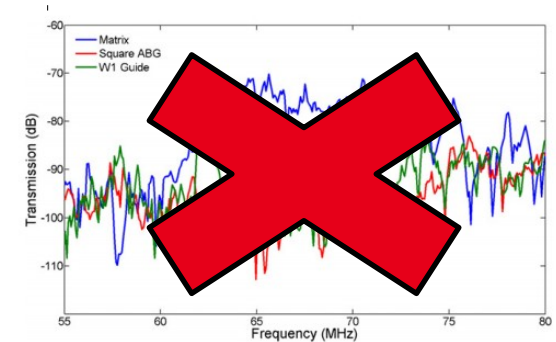


PROBLÉMATIQUES À ADRESSER

PERTES D'INSERTION

- Pertes à l'étage RF = dégradation irréversible du rapport signal/bruit
- Origine de ces pertes
 - Acoustiques : optimiser matériaux, géométries, ...
 - Transduction :
 - **Eviter les lignes à retard !**
 - Eviter transitions acoustiques !

Attention à
l'interface
acoustique/RF

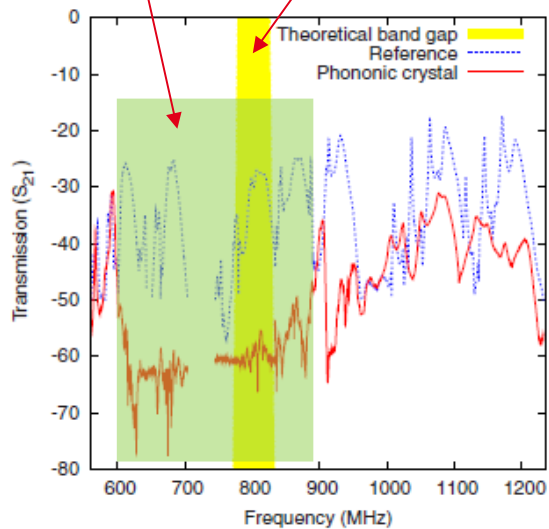


Mohammadi, Solid-State Sensors 167, 524 (2011)

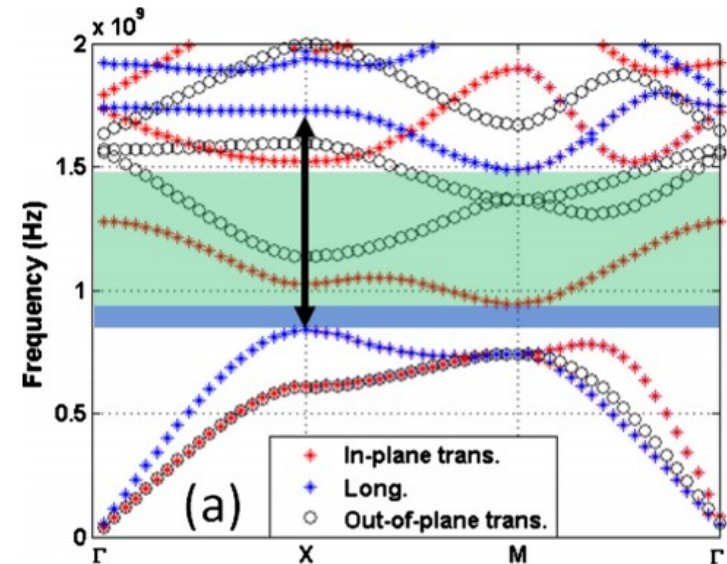
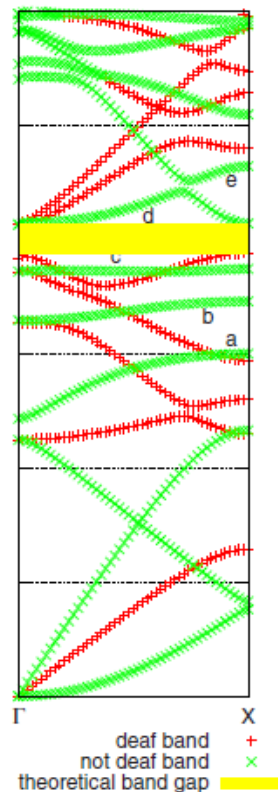
BANDE D'ARRÊT OU ATTÉNUATION ?

Atténuation effective

Bande d'arrêt



Gorisse, APL 98, 234103 (2011)



Soliman, APL 97, 193502 (2010)

- **Bande d'arrêt = aucun mode n'existe**
 - Mais, tous les modes du cristal ne sont pas forcément excitables
 - **Quantité vraiment utile = transmission à travers le cristal**
(interface acoustique / acoustique)

MONTÉE EN FRÉQUENCE

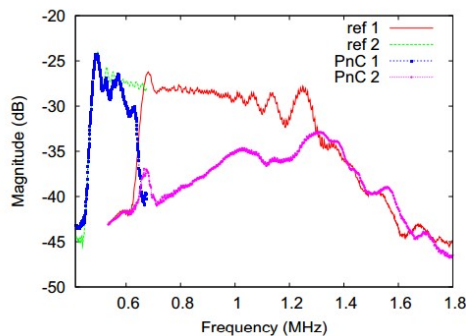
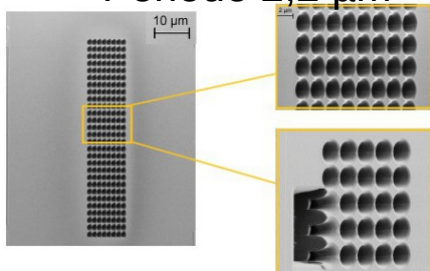
- Fréquences utiles pour la RF : 400 MHz – 3 GHz (voire 5 GHz)

⇒ **Contraintes technologiques sur la réalisation des cristaux**

Cristal LiNbO_3 /air:

Trous de 2 μm
Profondeur 2,3 μm
Période 2,2 μm

Usinage par
faisceau d'ions
localisés (FIB)

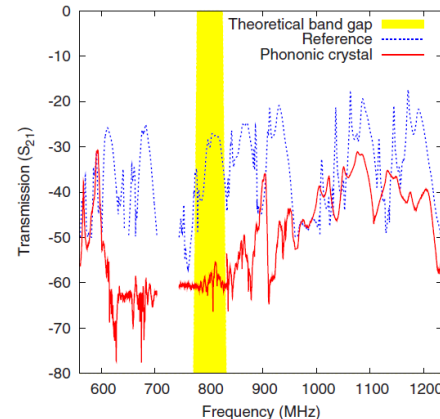
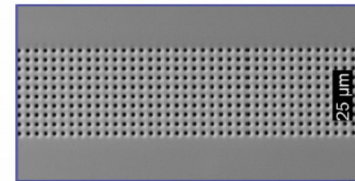


Benchabane, Ultrasonics 2010

Cristal AlN /air:

Trous de 2 μm
Profondeur 2 μm
Période 6,6 μm

Usinage par
gravure ionique
réactive (RIE)

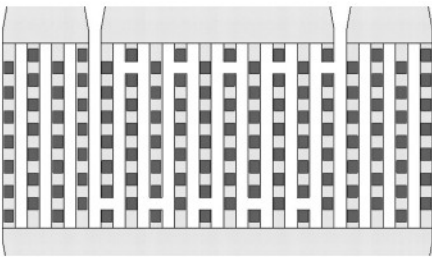


Gorisse, APL 98, 234103 (2011)

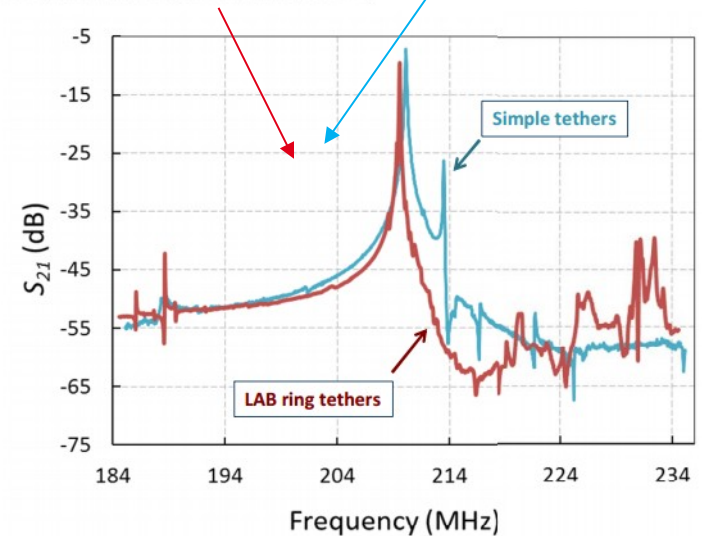
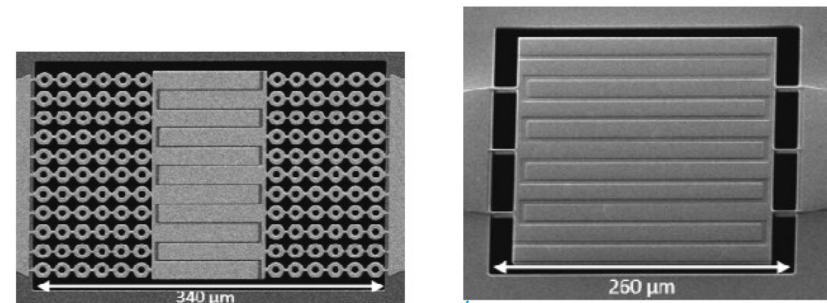
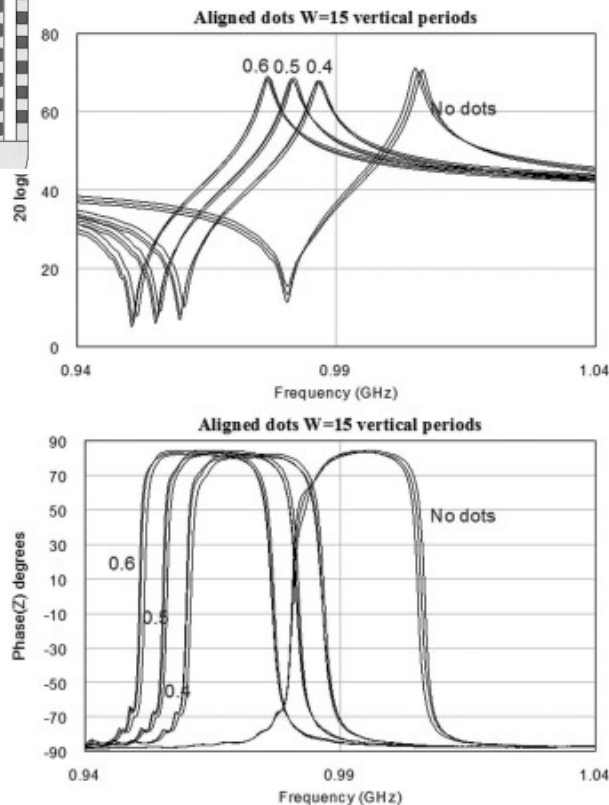
QUELLE PLACE POUR LES MÉTAMATÉRIAUX ?

APPLICATIONS POSSIBLES : BRIQUES ÉLÉMENTAIRES

- Isolation acoustique
- Suppression de parasites



Solal, IEEE TUFFC 57, 30 (2010)



Sorenson, IFCS 2011

APPLICATIONS POSSIBLES : BRIQUES ÉLÉMENTAIRES

- **Au-delà des bandes d'arrêt : milieux effectifs**
 - Nouveau degré de liberté pour la propagation d'ondes
 - confinement, guidage, adaptation entre milieux
→ suppression de parasites
 - Diodes acoustiques
- **Couplage « multiphysiques »**
 - Acoustique – optique : adresser communications optiques
 - Acoustique – thermique : gestion de la chaleur
- **MAIS, il reste de fortes contraintes**
 - Implémentation
 - Etre réalisable
 - Compatibilité avec procédés existants
 - **Ne pas dégrader les performances existantes**

Merci de votre attention



leti