

Résonateurs à Ondes Acoustiques Guidées sur Miroir de Bragg

Issiaka Koné

Soutenance de thèse Université de Sciences et Technologie de Lille (USTL)

Directeur de thèse : Bertrand Dubus

Co-directeur de thèse : Lionel Buchaillet

Encadrant CEA/Leti : Alexandre Reinhardt

Encadrants STMicroelectronics : Fabrice Casset, Jean François Carpentier

8 Avril 2010

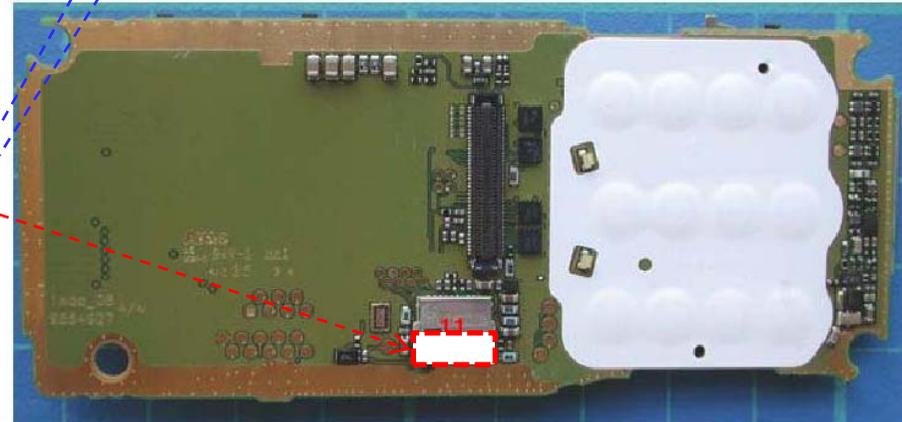
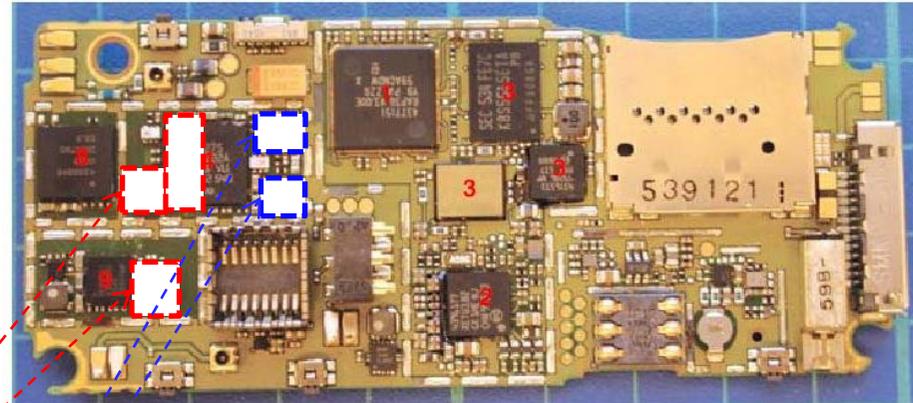


Contexte de la thèse

Eclaté d'un téléphone portable

□ Un téléphone portable tri-bande contient plus de 12 filtres qui prennent une place importante et ne sont pas intégrables

- 6 filtres pour l'étage RF
- 6 filtres pour l'étage IF



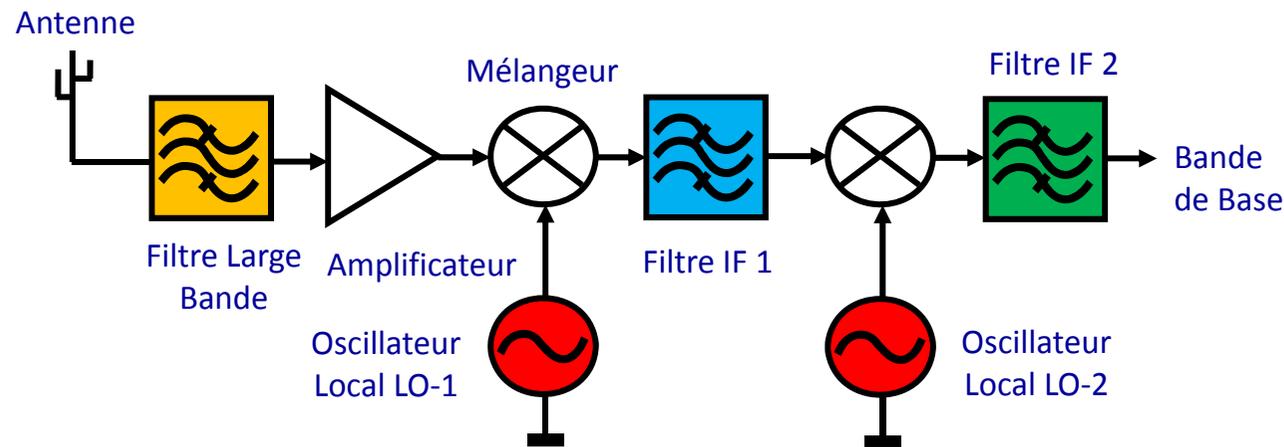
Filtres et duplexeurs RF

Oscillateurs

□ Augmentation du nombre de standards → Impose co-intégration et réduction de la taille → réduction du coût de fabrication et d'assemblage → Intérêt pour les composants acoustiques co-intégrables

Architecture d'un récepteur

- ❑ La réception est basée sur le filtrage, l'amplification et la translation de la fréquence du signal



- ❑ Réduction de taille rendu possible notamment grâce aux composants acoustiques SAW, BAW (Fort coefficient de qualité, plus compacts, se fabriquent en grande quantité) :

- Plus de 75 % de part de marché pour les SAW
- Moins de 25 % pour les BAW (Robert Aigner, *SAW and BAW Technologies for RF Filter Applications: A Review of the Relative Strengths and Weaknesses*, 2008)

→ Recherche active sur les composants acoustiques : SAW, BAW, Ondes de Lamb

BAW : Bulk Acoustic Wave

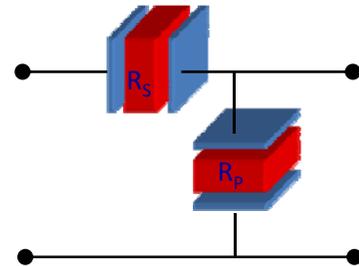
SAW : Surface Acoustic Wave

IF : Intermediate Frequency / Fréquence Intermédiaire

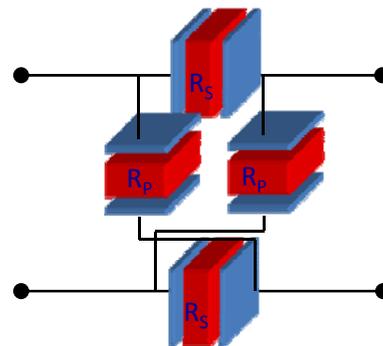
Les éléments d'un filtre électrique

- Un filtre électrique est constitué de deux ou plusieurs résonateurs connectés entre eux
 - La bande passante est réalisée par le comportement passant des résonateurs séries et bloquant des résonateurs parallèles

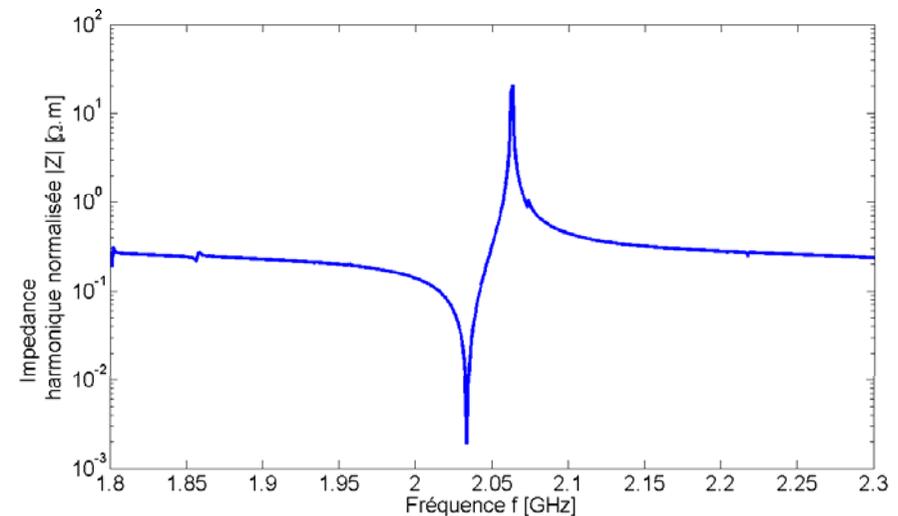
Connexion de type Ladder ou en échelle



Connexion de type Lattice ou en treillis



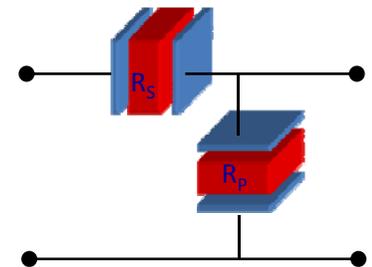
Réponse (Impédance harmonique normalisée) d'un résonateur



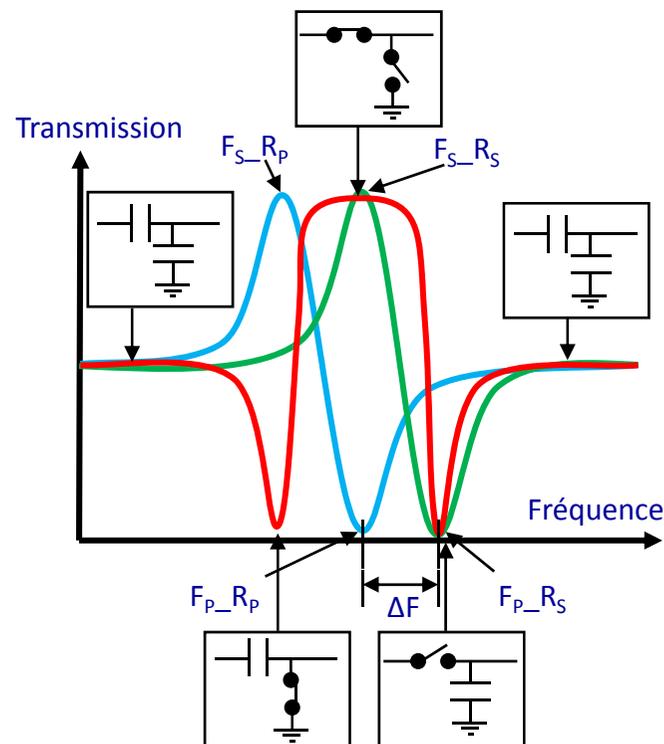
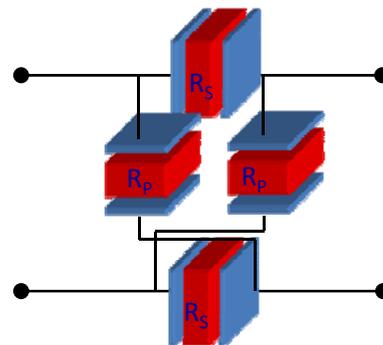
Les éléments d'un filtre électrique

- Un filtre électrique est constitué de deux ou plusieurs résonateurs connectés entre eux
 - La bande passante est réalisée par le comportement passant des résonateurs séries et bloquant des résonateurs parallèles

Connexion de type Ladder ou en échelle



Connexion de type Lattice ou en treillis



Paramètres : k^2 , F , Q

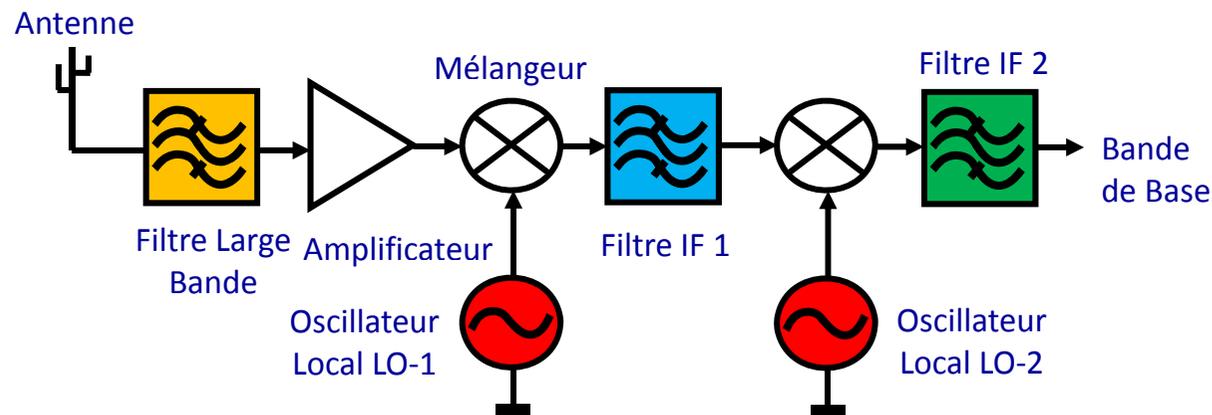
k^2 : Coefficient de couplage → Largeur de la bande : $2 \cdot \Delta F$

F : Fréquence centrale

Q : Facteur de qualité → pertes d'insertion

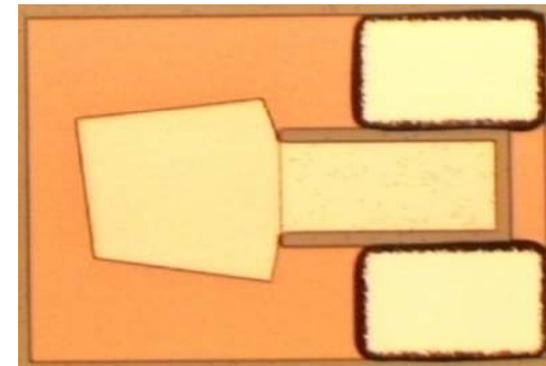
Résonateur RF : état de l'art

- ❑ Le filtre RF (aussi appelé filtre large bande) est constitué de résonateurs RF : son rôle est de laisser passer uniquement les signaux de la bande désirée (Ex. la bande GSM)



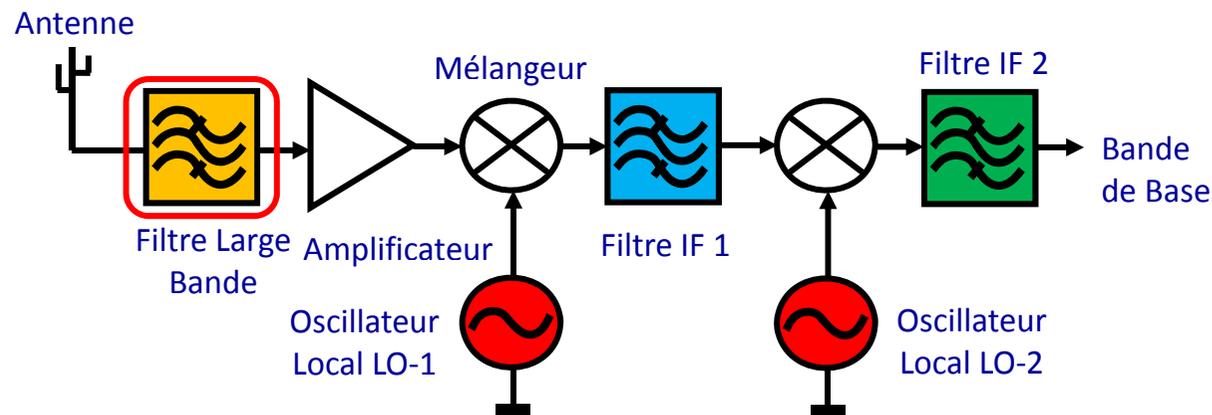
Photographie d'un résonateur BAW

- ❑ Filtre RF large bande BAW
- ❑ Fréquence 2 à 5 GHz
- ❑ Coefficient de couplage $k_t^2 = 5$ à 7 %
- ❑ Facteur de qualité $Q = 2\ 000$



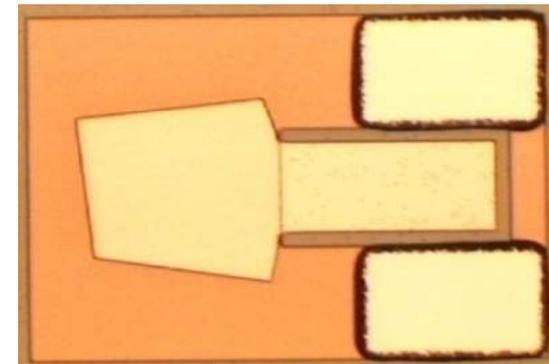
Résonateur RF : état de l'art

- ❑ Le filtre RF (aussi appelé filtre large bande) est constitué de résonateurs RF : son rôle est de laisser passer uniquement les signaux de la bande désirée (Ex. la bande GSM)



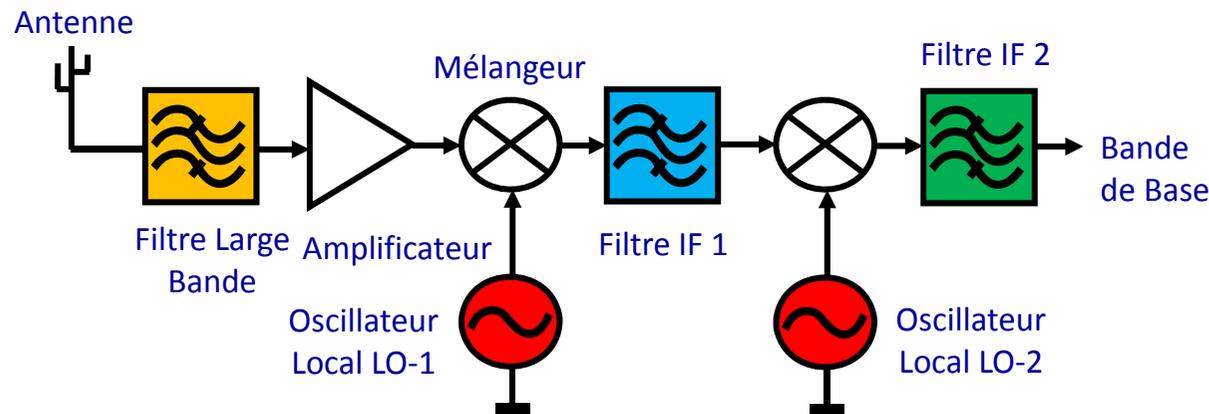
Photographie d'un résonateur BAW

- ❑ Filtre RF large bande BAW
- ❑ Fréquence 2 à 5 GHz
- ❑ Coefficient de couplage $k_t^2 = 5$ à 7 %
- ❑ Facteur de qualité $Q = 2\ 000$

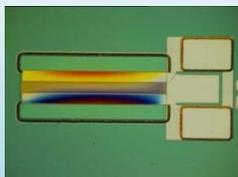


Résonateur IF : état de l'art

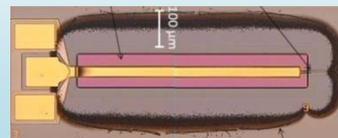
- ❑ Le filtre IF (aussi appelé filtre de canal) est constitué de résonateurs IF : son rôle est de laisser passer uniquement les signaux du canal désiré
- ❑ Les filtres IF sont des filtres SAW mais on s'intéresse de plus en plus aux filtres à ondes de Lamb



- ❑ Filtre de canal basse fréquence (Technologie CEA/Leti)
- ❑ Fréquence 100 MHz à 300 MHz

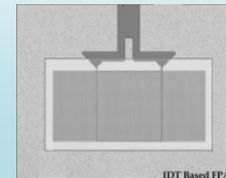


Volatier 2005
 $F = 92 \text{ MHz}$
 $Q = 2000$
 $k^2 = 0.8 \%$



Desvergne 2007
 $F = 244 \text{ MHz}$
 $Q = 2150$
 $k^2 = 0.1 \%$

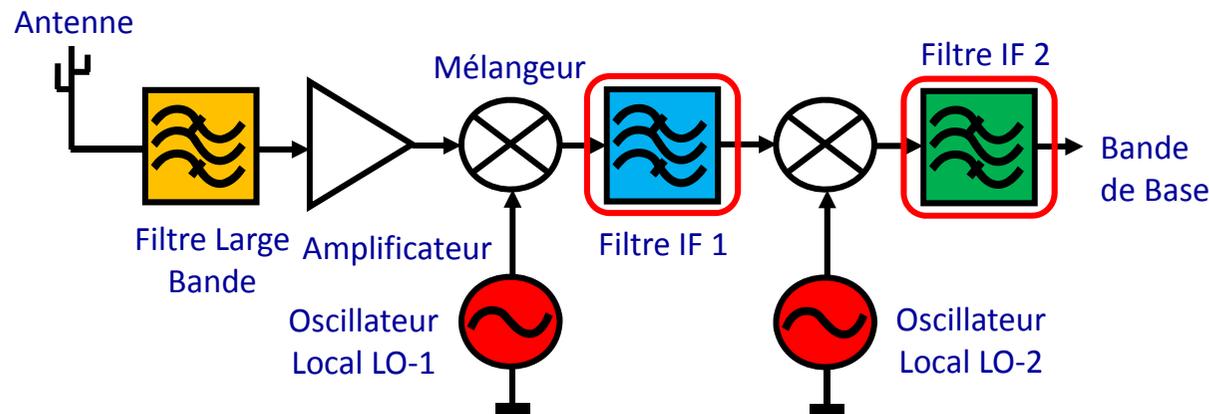
- ❑ Filtre de canal haute fréquence : filtrage en bande RF
- ❑ Fréquence 1 GHz à 2 GHz
- ❑ Facteur de couplage désiré $k^2 = 1 \%$ à 2%



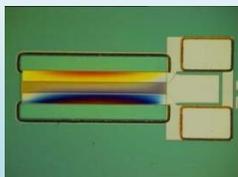
Yantchev 2007
 $F = 885 \text{ MHz}$
 $Q = 3000$
 $k^2 = 0.18 \%$

Résonateur IF : état de l'art

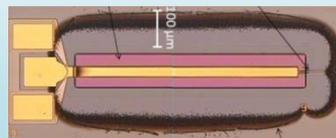
- ❑ Le filtre IF (aussi appelé filtre de canal) est constitué de résonateurs IF : son rôle est de laisser passer uniquement les signaux du canal désiré
- ❑ Les filtres IF sont des filtres SAW mais on s'intéresse de plus en plus aux filtres à ondes de Lamb



- ❑ Filtre de canal basse fréquence (Technologie CEA/Leti)
- ❑ Fréquence 100 MHz à 300 MHz

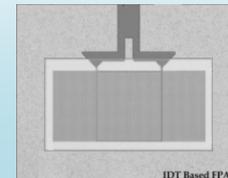


Volatier 2005
 $F = 92 \text{ MHz}$
 $Q = 2000$
 $k^2 = 0.8 \%$



Desvergne 2007
 $F = 244 \text{ MHz}$
 $Q = 2150$
 $k^2 = 0.1 \%$

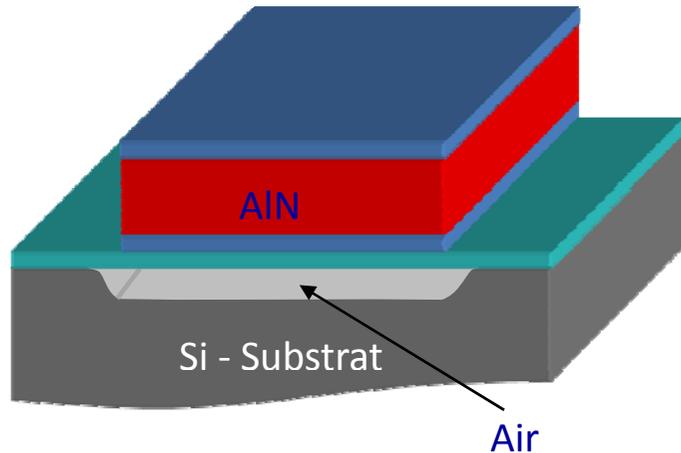
- ❑ Filtre de canal haute fréquence : filtrage en bande RF
- ❑ Fréquence 1 GHz à 2 GHz
- ❑ Facteur de couplage désiré $k^2 = 1 \%$ à 2%



Yantchev 2007
 $F = 885 \text{ MHz}$
 $Q = 3000$
 $k^2 = 0.18 \%$

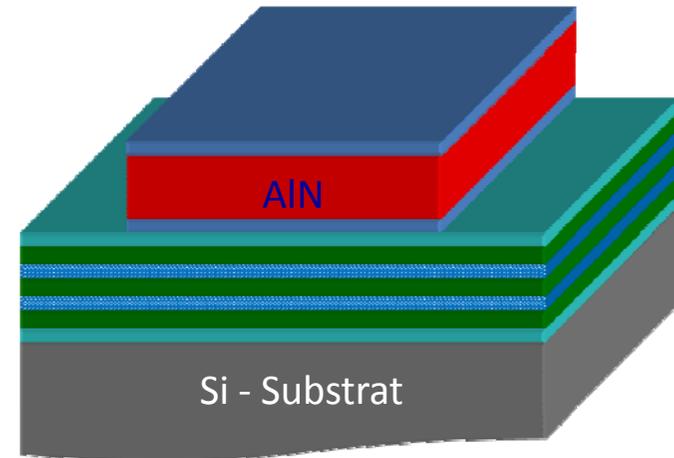
Technologies de résonateurs RF

□ BAW-FBAR : Résonateur suspendu sur une cavité d'air



□ BAW-SMR : Résonateur au dessus d'un empilement (miroir de Bragg)

○ Alternance de couches d'impédance acoustique forte et faible



□ SAW

○ Intérêt : paramètres fixés par la géométrie des peignes



Acronymes

BAW : Bulk Acoustic Wave

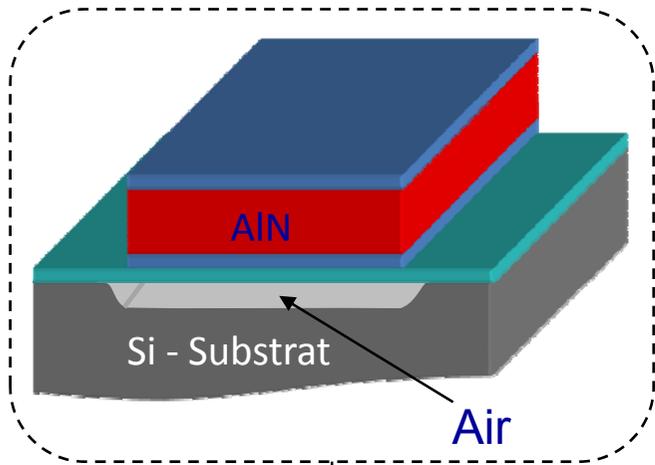
FBAR : Film Bulk Acoustic Wave Resonator

SMR : Solidly Mounted Resonator

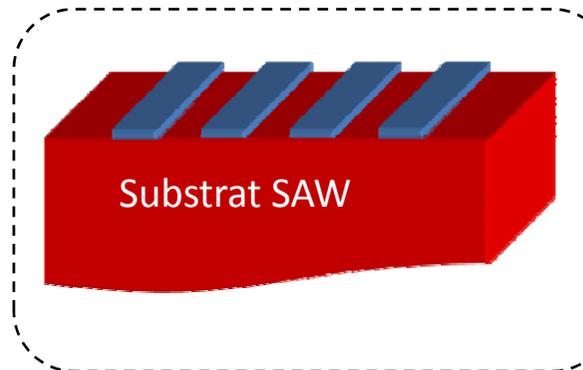
SAW : Surface Acoustic Wave

Objet d'étude de la thèse

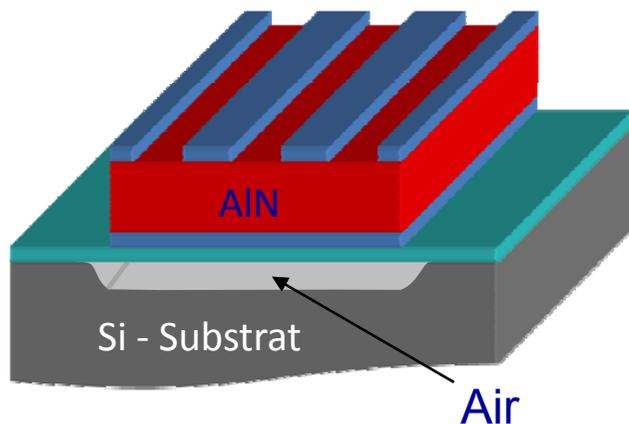
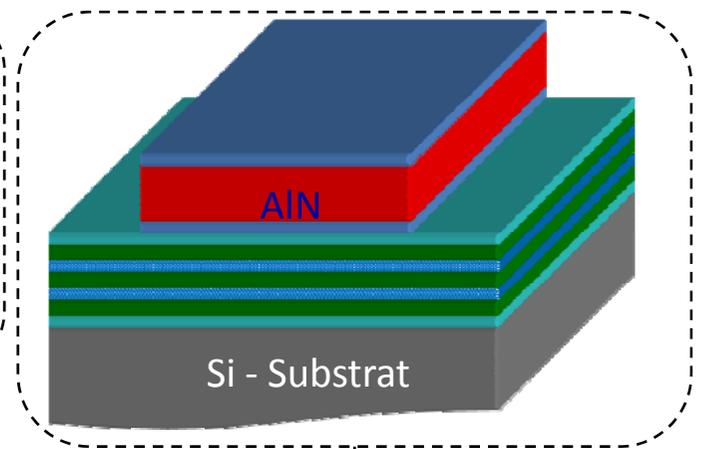
☐ Technologie BAW-FBAR



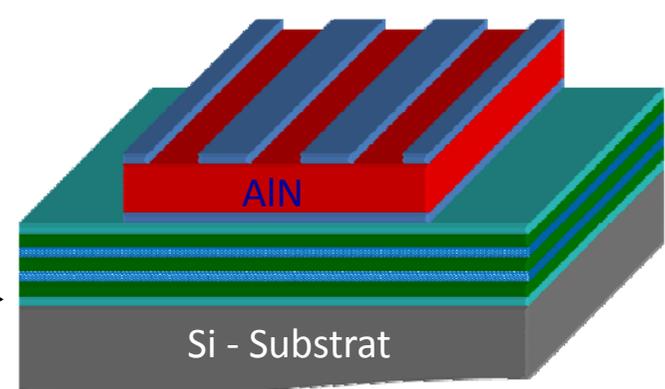
☐ Technologie SAW



☐ Technologie BAW-SMR



☐ Technologie des résonateurs à onde de Lamb



☐ Technologie des résonateurs à ondes guidées

Objet d'étude de la thèse

Technologie BAW-FBAR

Technologie SAW

Technologie BAW-SMR

Forte **limitation** des BAW : Les paramètres sont fixés uniquement par les épaisseurs

SAW : **Flexibilité** due aux **peignes** → permet de sélectionner des fréquences différentes sur la même plaque

Ondes de Lamb : La conception de membrane (cavité d'air) n'est pas le choix stratégique de STMicroelectronics/CEA-Leti (Propriété Intellectuelle)

Technologie BAW-SMR STMicroelectronics/ CEA-Leti mature

→ **Utiliser une technologie proche des BAW et pouvoir faire varier la fréquence**

Le dispositif est alors **co-intégrable** avec les **BAW-SMR**

Etude scientifiquement intéressante et concept innovant

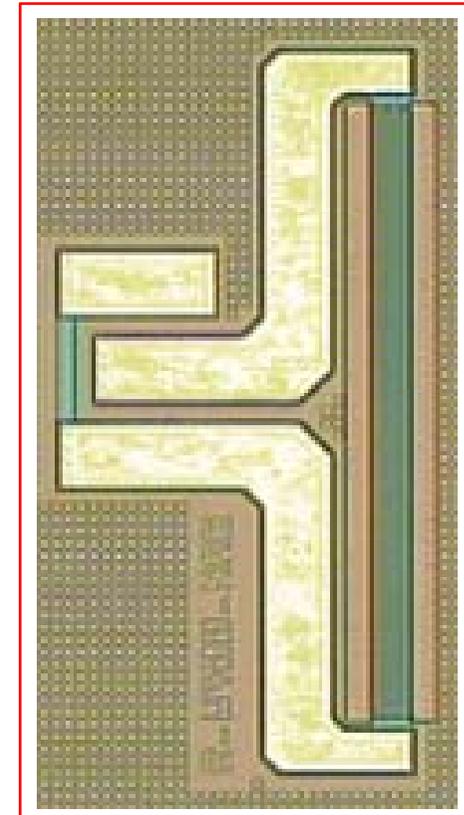
Technologie des résonateurs à onde de Lamb

Technologie des résonateurs à ondes guidées

Objectifs de la thèse

- ❑ Filtres de canal à haute **F**réquence **I**ntermédiaire (FI haute)

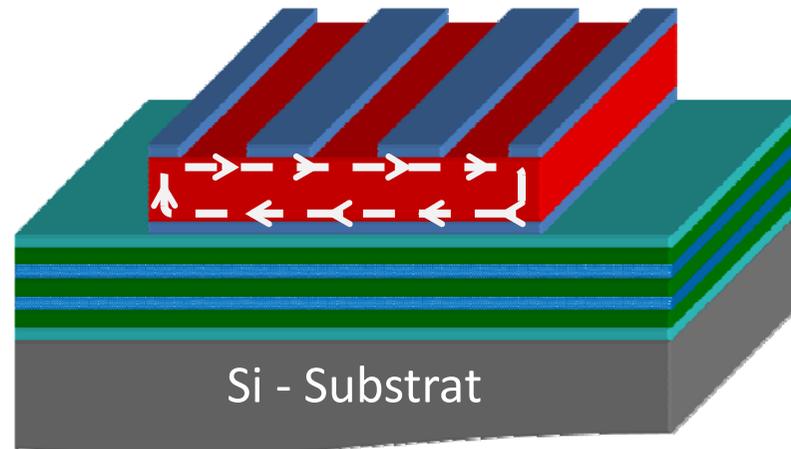
- ❑ Spécifications visées dans le cadre de cette thèse :
 - Fréquence = 2 GHz
 - Facteur de qualité $Q > 1\ 000$
 - Facteur de couplage désiré $k^2 = 1\ % \text{ à } 2\ %$



Plan de la présentation

- ❖ Conception des résonateurs
- ❖ Procédé de fabrication
- ❖ Caractérisation des composants

Conception des résonateurs

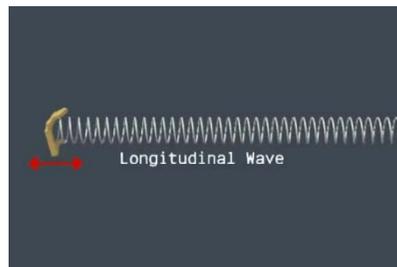


- ❖ Etude de la propagation des ondes acoustiques
- ❖ Etude du problème d'isolation
- ❖ Optimisation des électrodes

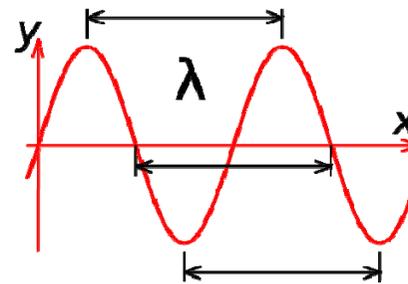
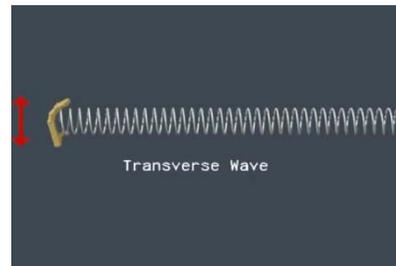
Propagation des ondes acoustiques guidées

- ❑ Les ondes de Lamb sont des ondes de plaque constituées par la combinaison de plusieurs ondes planes : longitudinales et transversales
- ❑ Les ondes guidées sont des ondes de Lamb généralisées se propageant dans une structure multi-couche

Onde longitudinale



Onde transversale

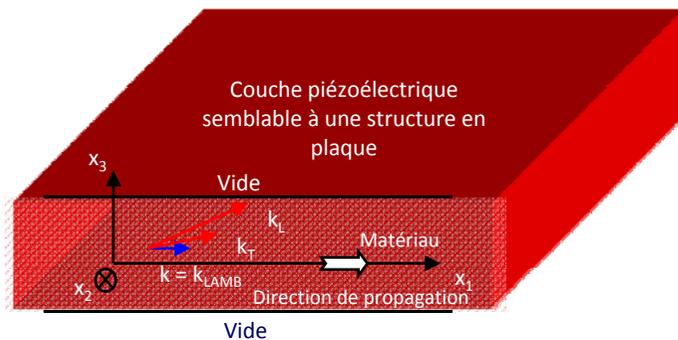


La longueur d'onde est λ

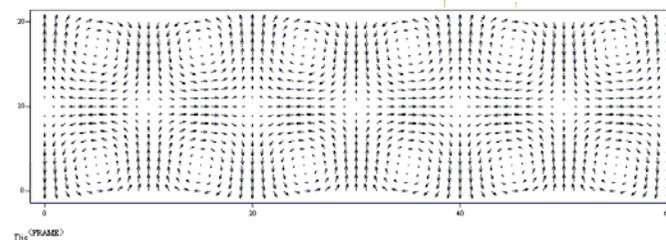
Le vecteur d'onde est

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

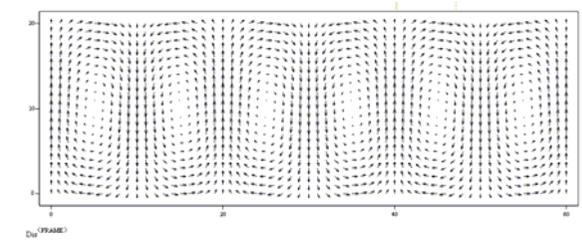
Les ondes de Lamb ont deux types de déformations : symétriques et anti-symétriques



Déformations symétriques

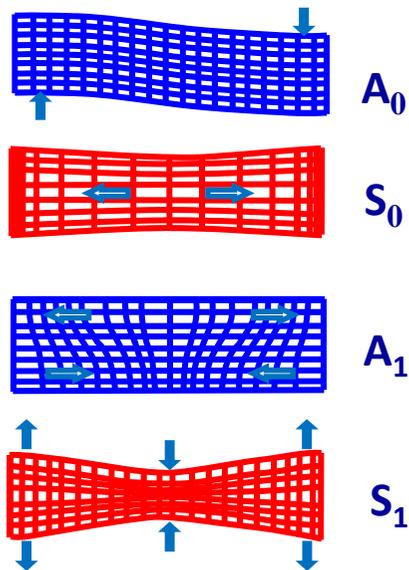


Déformations anti-symétriques

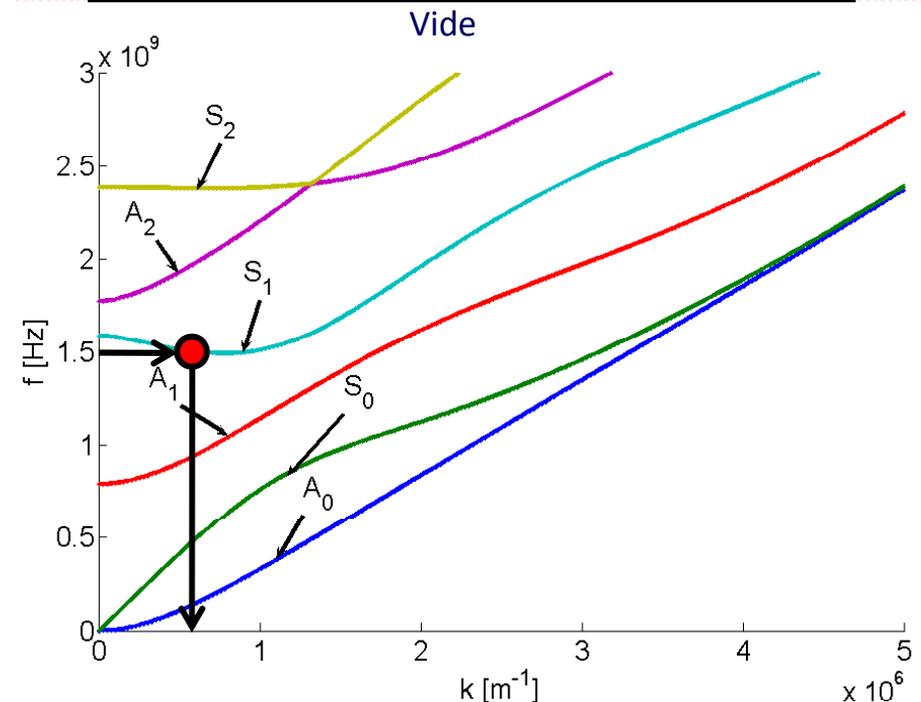
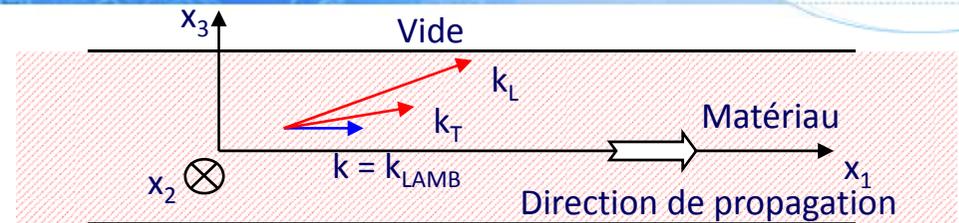


Propagation des ondes acoustiques guidées

- ❑ Les courbes de dispersion permettent de comprendre la propagation des ondes : Elles donnent pour chaque vecteur d'onde (k) la fréquence (f) des ondes qui peuvent se propager dans la structure
- ❑ Déformations possibles de la plaque



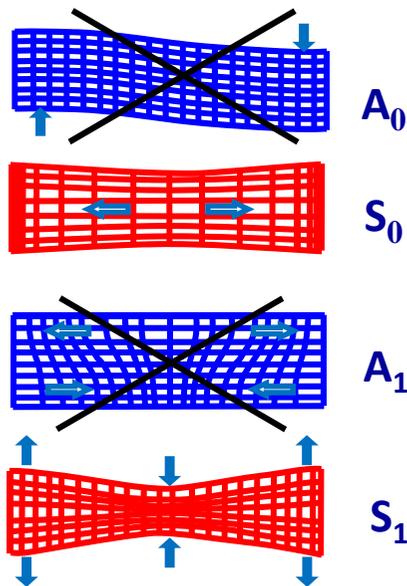
- ❑ Symétrique (S)
- ❑ Antisymétrique (A)



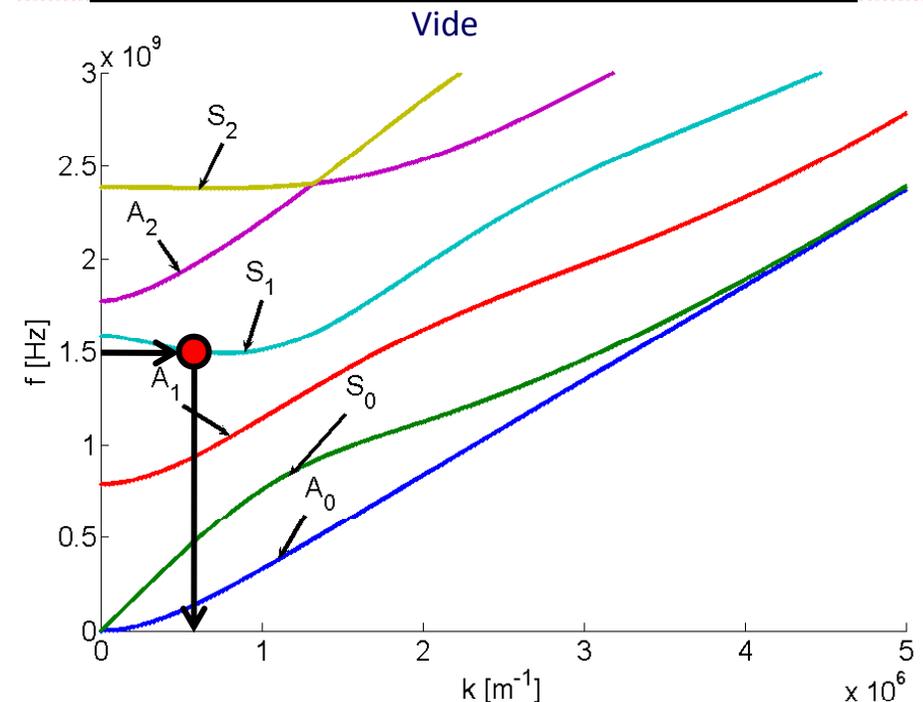
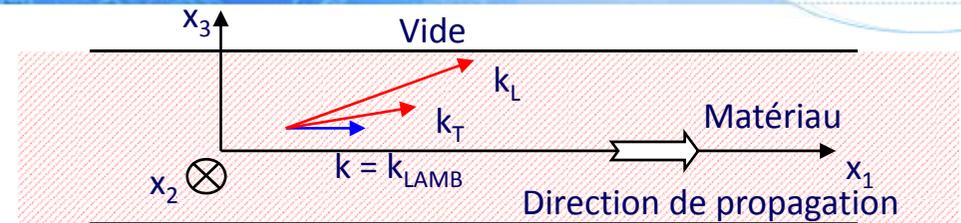
- ❑ Le point rouge indique qu'une onde de type S₁ peut se propager dans la structure à la fréquence $F = 1.5$ GHz avec un vecteur d'onde $k = 0.6$ m^{-1}
- ❑ Si de plus la largeur de la structure correspond à la moitié de $\lambda = 2\pi/k$, la structure se met à résonner à la fréquence $F \rightarrow$ Si k est grand, λ est petit \rightarrow problème de résolution technologique
- ❑ Le mode S₁ est le plus adéquat pour des fréquences supérieures au GHz

Propagation des ondes acoustiques guidées

- Les courbes de dispersion permettent de comprendre la propagation des ondes : Elles donnent pour chaque vecteur d'onde (k) la fréquence (f) des ondes qui peuvent se propager dans la structure
- Déformations possibles de la plaque



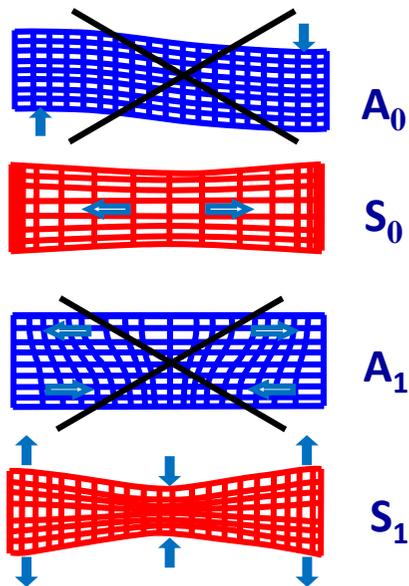
- Symétrique (S)
- Antisymétrique (A)



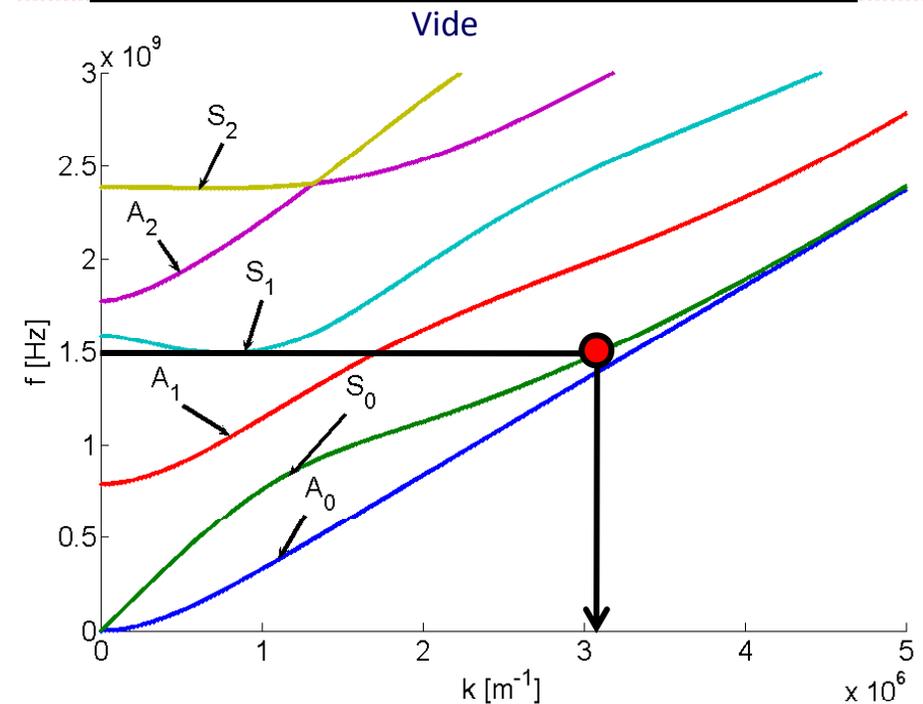
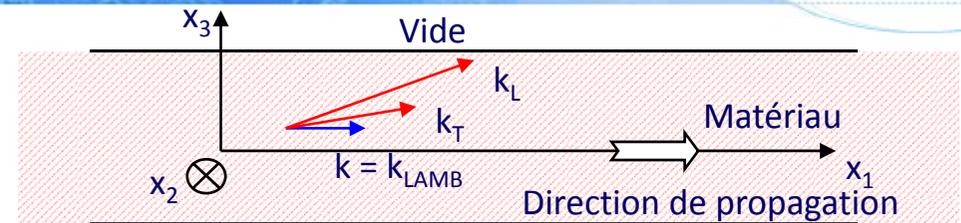
- Le point rouge indique qu'une onde de type S_1 peut se propager dans la structure à la fréquence $F = 1.5$ GHz avec un vecteur d'onde $k = 0.6$ m^{-1}
- Si de plus la largeur de la structure correspond à la moitié de $\lambda = 2\pi/k$, la structure se met à résonner à la fréquence $F \rightarrow$ Si k est grand, λ est petit \rightarrow problème de résolution technologique
- Le mode S_1 est le plus adéquat pour des fréquences supérieures au GHz

Propagation des ondes acoustiques guidées

- Les courbes de dispersion permettent de comprendre la propagation des ondes : Elles donnent pour chaque vecteur d'onde (k) la fréquence (f) des ondes qui peuvent se propager dans la structure
- Déformations possibles de la plaque



- Symétrique (S)
- Antisymétrique (A)



- Le point rouge indique qu'une onde de type S_1 peut se propager dans la structure à la fréquence $F = 1.5$ GHz avec un vecteur d'onde $k = 0.6$ m^{-1}
- Si de plus la largeur de la structure correspond à la moitié de $\lambda = 2\pi/k$, la structure se met à résonner à la fréquence $F \rightarrow$ Si k est grand, λ est petit \rightarrow problème de résolution technologique
- Le mode S_1 est le plus adéquat pour des fréquences supérieures au GHz

Isolation des ondes acoustiques

Isolation des résonateurs à ondes guidées

- ❑ Evanescence des ondes : réduction de la vitesse de phase des ondes
 - Méthode basée sur la comparaison avec la vitesse des ondes dans le substrat

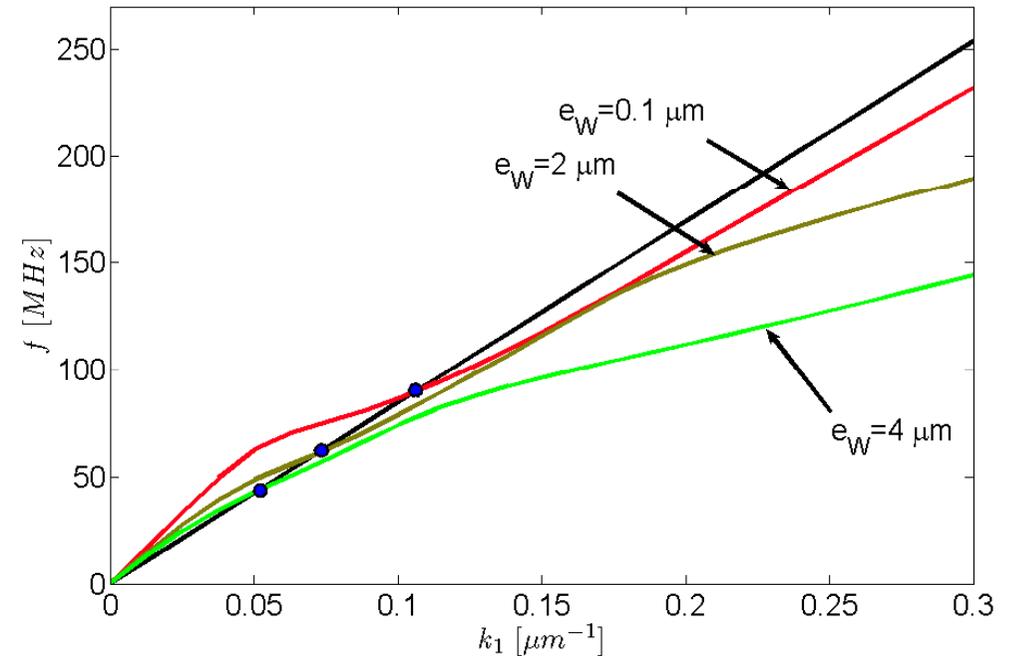
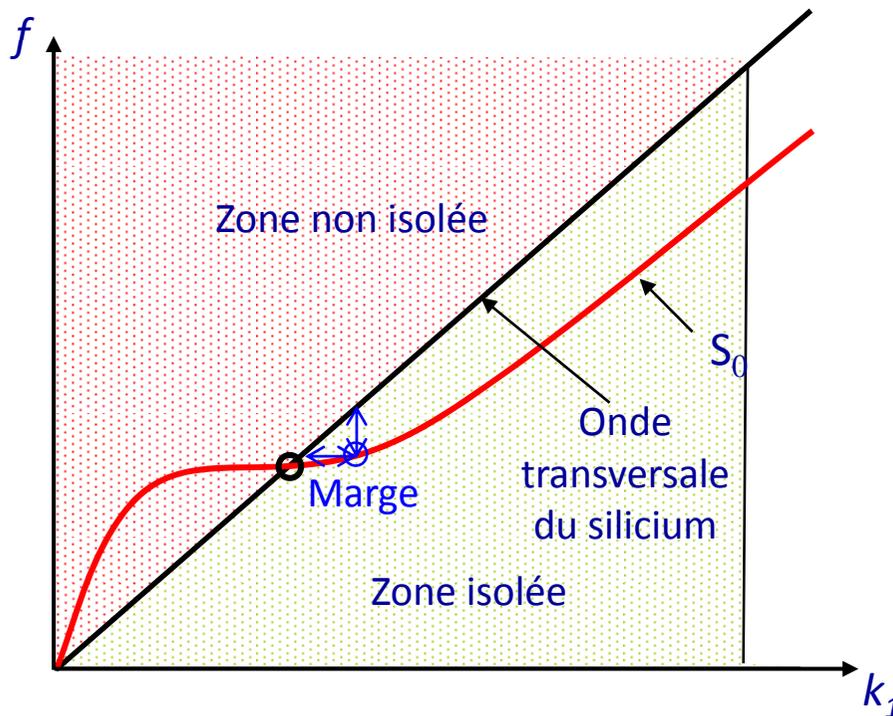
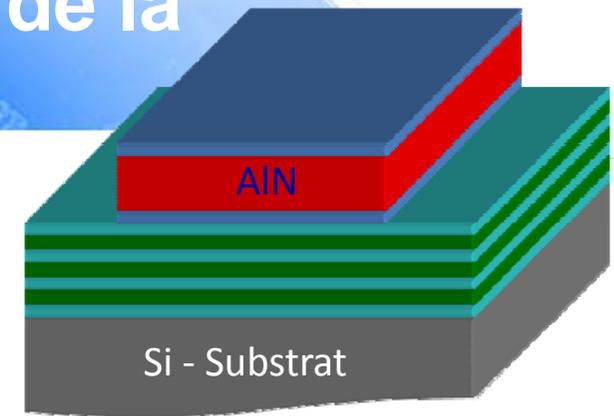
- ❑ Utilisation d'un miroir de Bragg
 - Méthode basée sur la théorie du miroir de Bragg

Réduction de la vitesse de phase des ondes

Evanescence des ondes : réduction de la vitesse de phase des ondes

Quand le vecteur d'onde de l'onde exploitée est plus grand que celui de l'onde de volume la plus lente du substrat, on atteint l'angle critique et l'onde n'est plus transmise

$$e_{SiO_2} = \frac{e_W \cdot C_{T_{SiO_2}}}{C_{TW}}$$



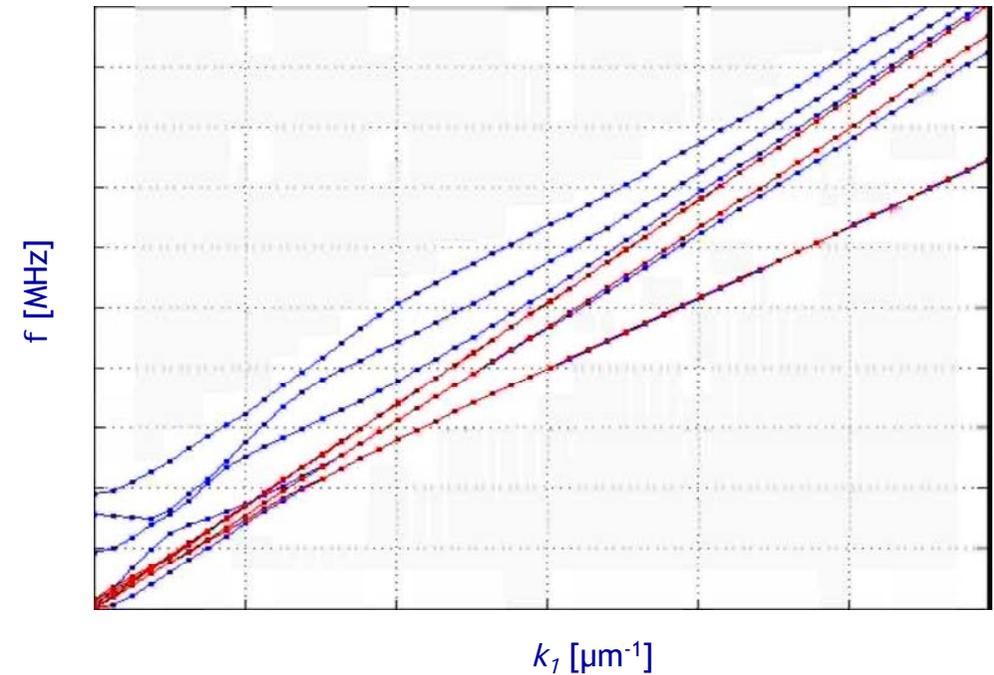
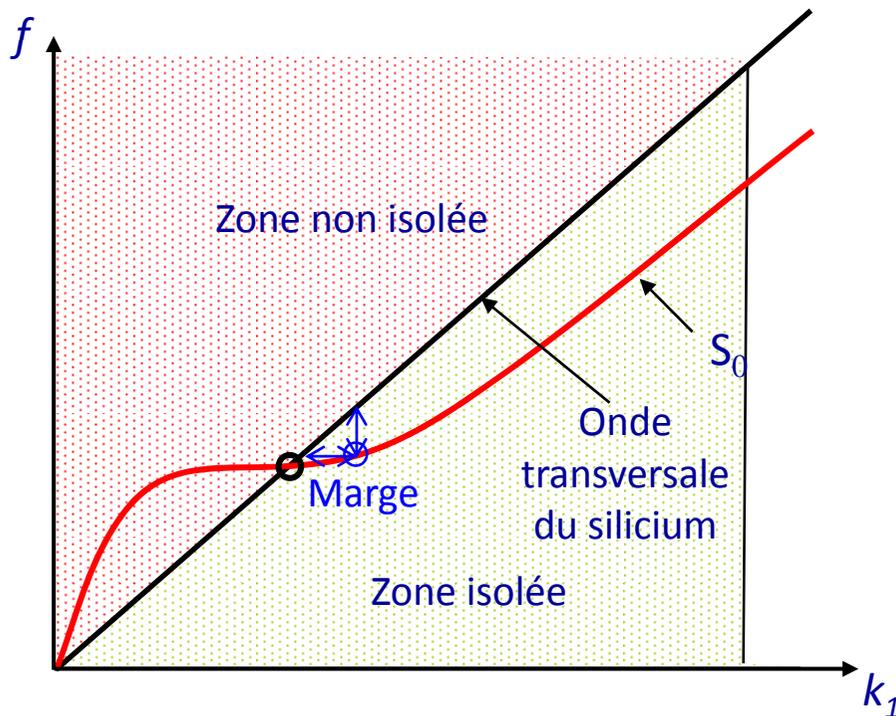
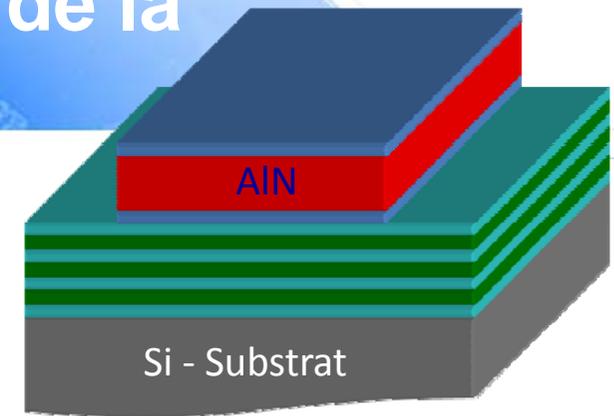
- A gauche de la droite : vecteur d'onde plus petit → Zone non isolée
- A droite : vecteur d'onde plus grand → Zone isolée

Simulation par
Eléments Finis

Evanescence des ondes : réduction de la vitesse de phase des ondes

Quand le vecteur d'onde de l'onde exploitée est plus grand que celui de l'onde de volume la plus lente du substrat, on atteint l'angle critique et l'onde n'est plus transmise

$$e_{SiO_2} = \frac{e_W \cdot C_{T_{SiO_2}}}{C_{TW}}$$



- A gauche de la droite : vecteur d'onde plus petit → Zone non isolée
- A droite : vecteur d'onde plus grand → Zone isolée

Simulation par
Eléments Finis

Utilisation d'un miroir de Bragg

Méthodes de calcul d'impédance harmonique

❑ Méthode de Mason

Méthode 1D

Similaire aux lignes de transmission RF (même théorie)

Adapté aux résonateurs BAW

❑ Calcul de l'impédance du résonateur : Matrice de réflexion & impédance harmonique

Méthode 3D

Méthode *matrice de réflexion*

Calcul des fonctions de Green

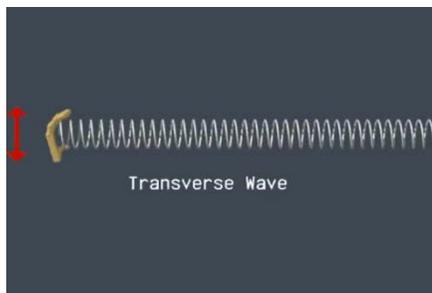
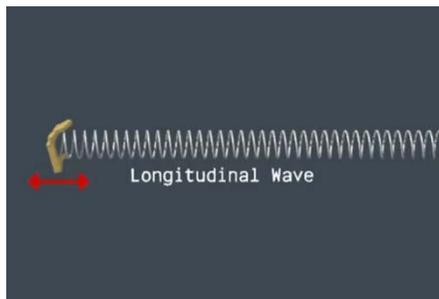
Calcul de permittivité effective ϵ_{EFF}

Calcul de l'admittance et impédance

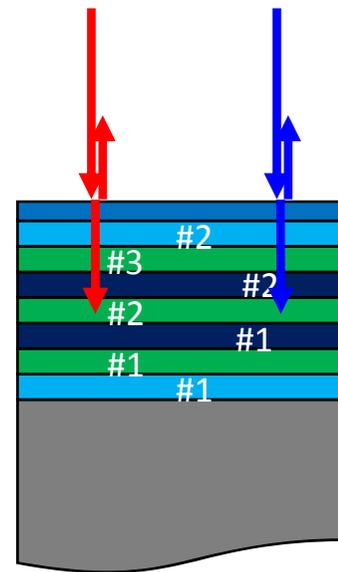
Ondes guidées sur miroir de Bragg

- ❑ Les modèles classiques ne permettent pas la prise en compte de la conversion de modes : Modèle de Mason, etc.

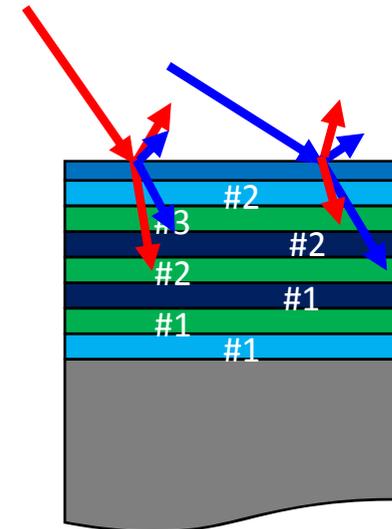
Rappel : Propagation des ondes longitudinales et transversales



— Onde partielle Longitudinale — Onde partielle Transversale



- ❑ Angle d'incidence non nul → conversion de modes :
Ex. : une onde longitudinale se transmet en onde transversale

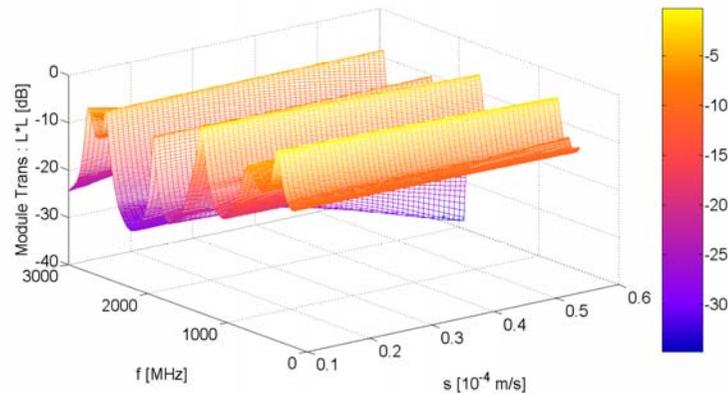


- ❑ Angle d'incidence nul → pas de conversion de modes à l'interface

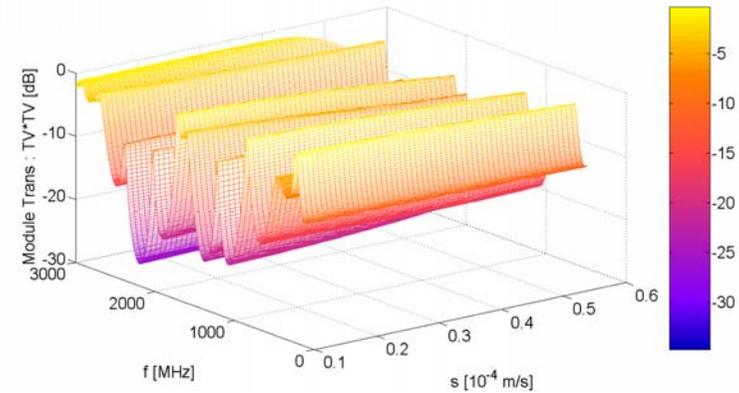
→ Utilisation de la méthode de la matrice de réflexion

Courbes de transmission du miroir de Bragg

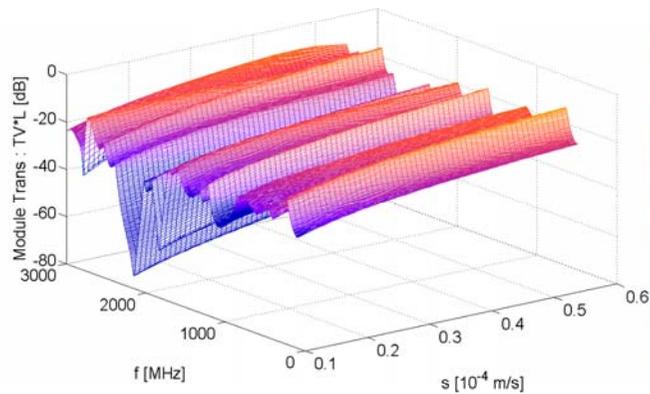
Onde longitudinale \rightarrow onde longitudinale



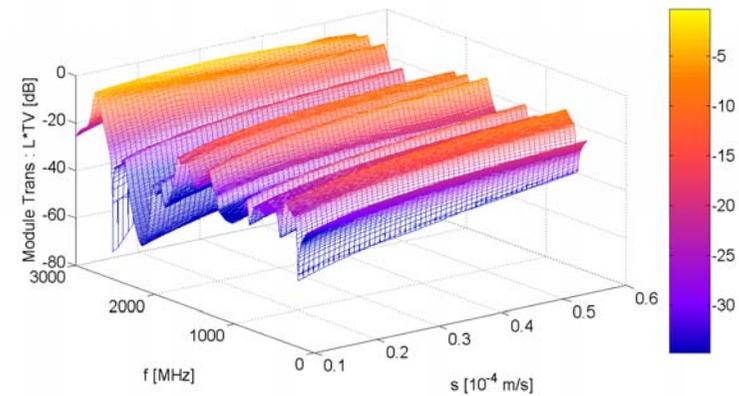
Onde transversale \rightarrow onde transversale



Onde longitudinale \rightarrow onde transversale



Onde transversale \rightarrow onde longitudinale



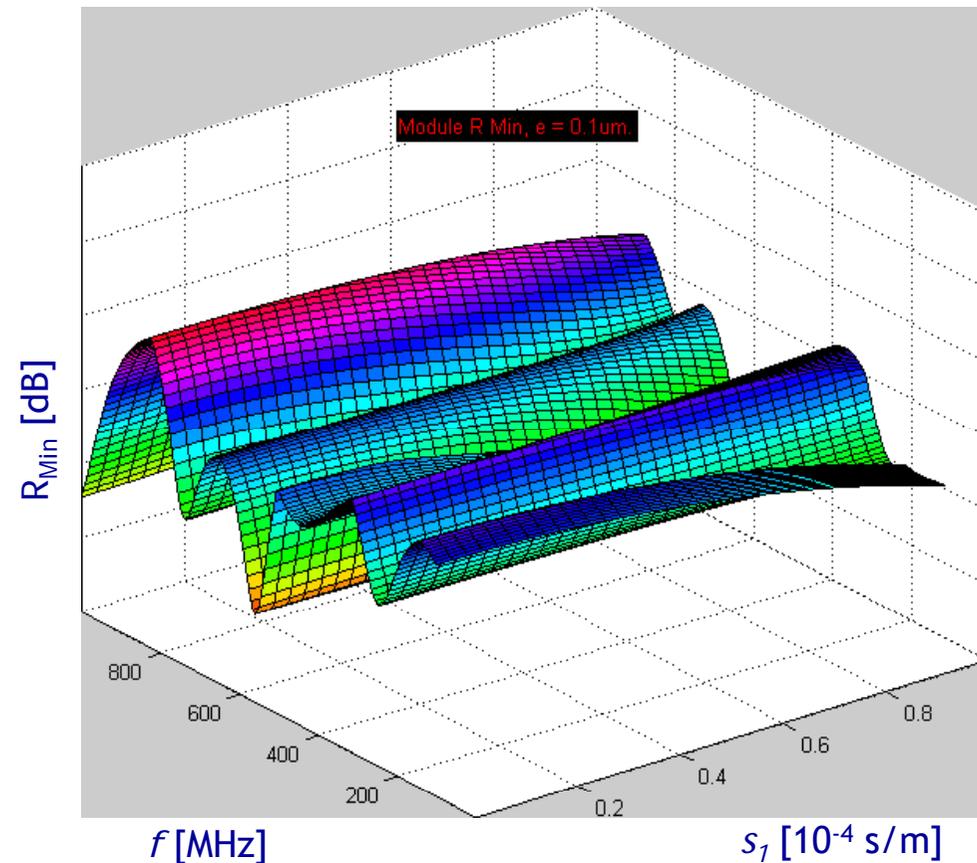
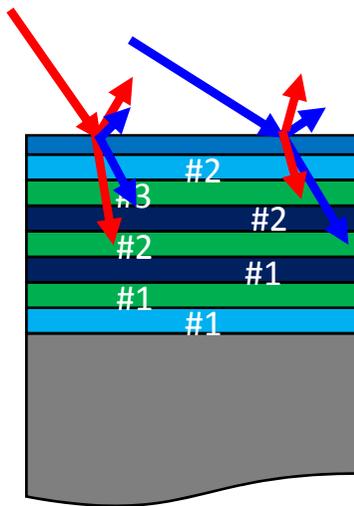
Calculs avec Matlab

Minimiser la transmission en fonction des épaisseurs

- ❑ Problème difficile car fortement non linéaire
 - Variation des épaisseurs des couches de SiN (#1, #2 et #3)
 - Effet très important sur la courbe de réflexion

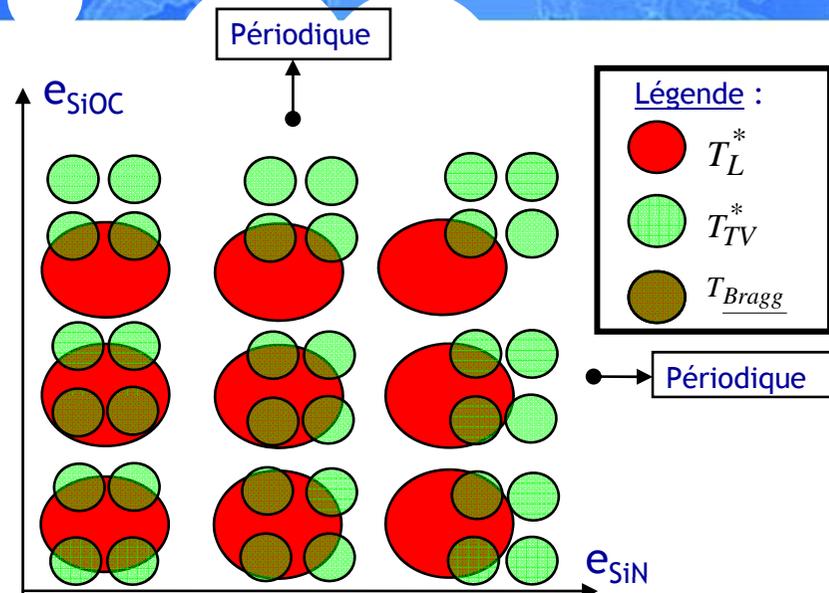
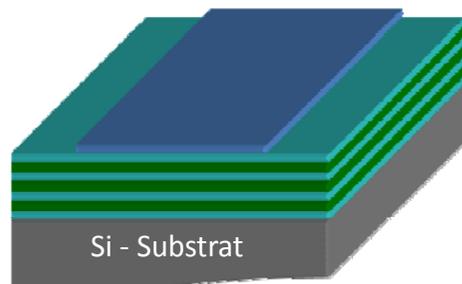
Animation :

- 1- Variation d'épaisseur couches #1 #2 et #3
- 2- Calcul de la réflexion à l'interface (méthode de la matrice de réflexion)
- 3- Pire cas : on considère la réflexion minimum de toutes les ondes



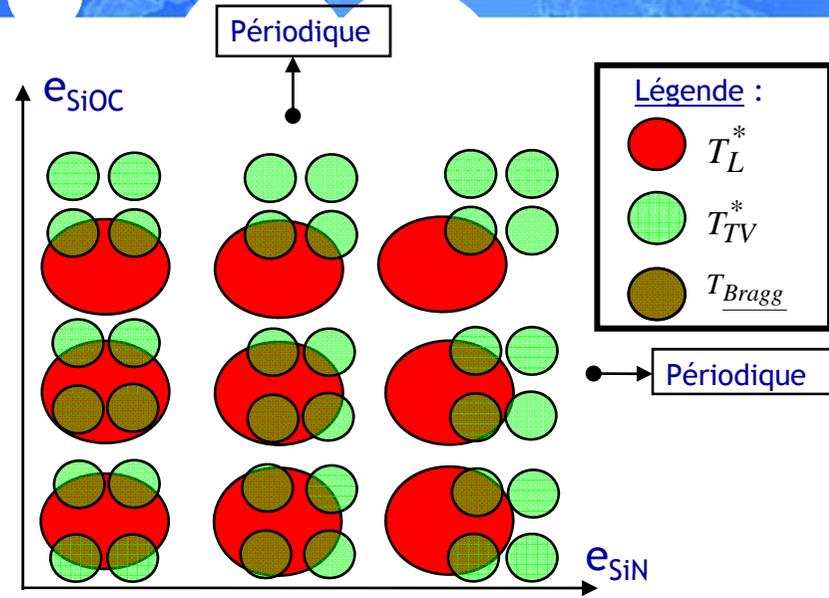
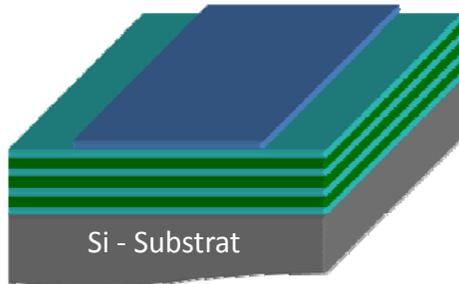
Recherche d'épaisseurs optimales

Empilement du miroir

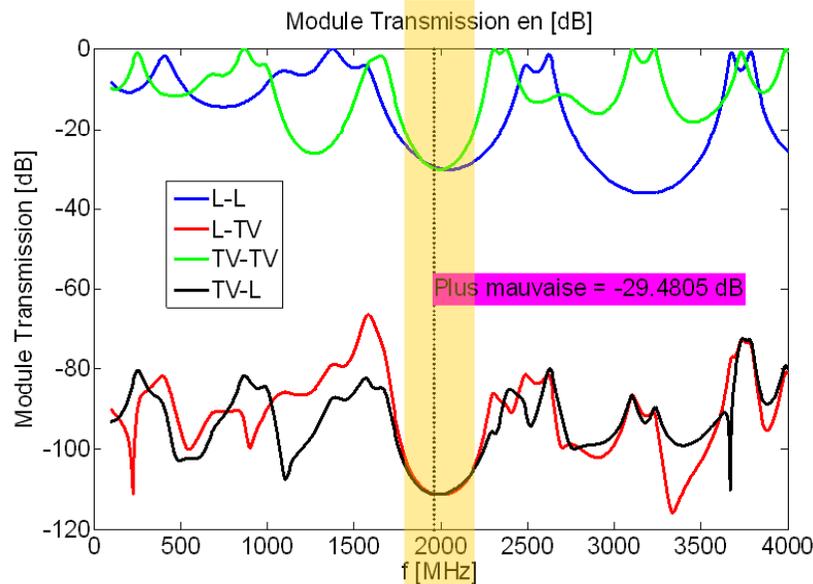
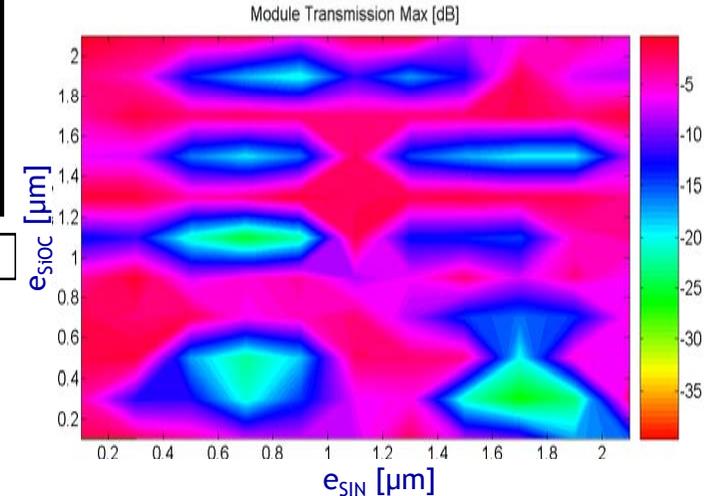


Recherche d'épaisseurs optimales

Empilement du miroir



Transmission en fonction des épaisseurs

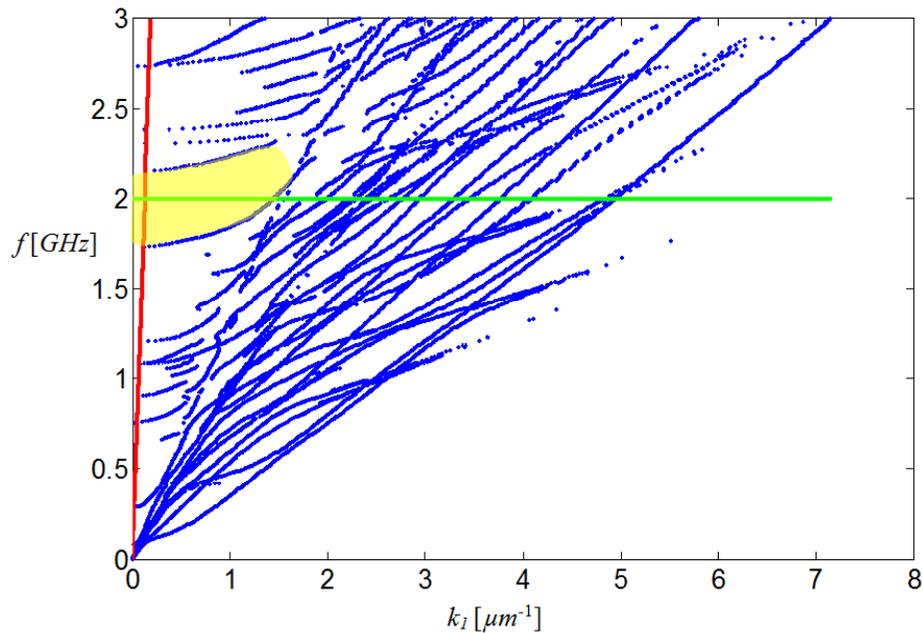


Variation indépendante des épaisseurs : Optimisation manuelle ou automatique (algorithme d'optimisation comme Gauss-Newton)

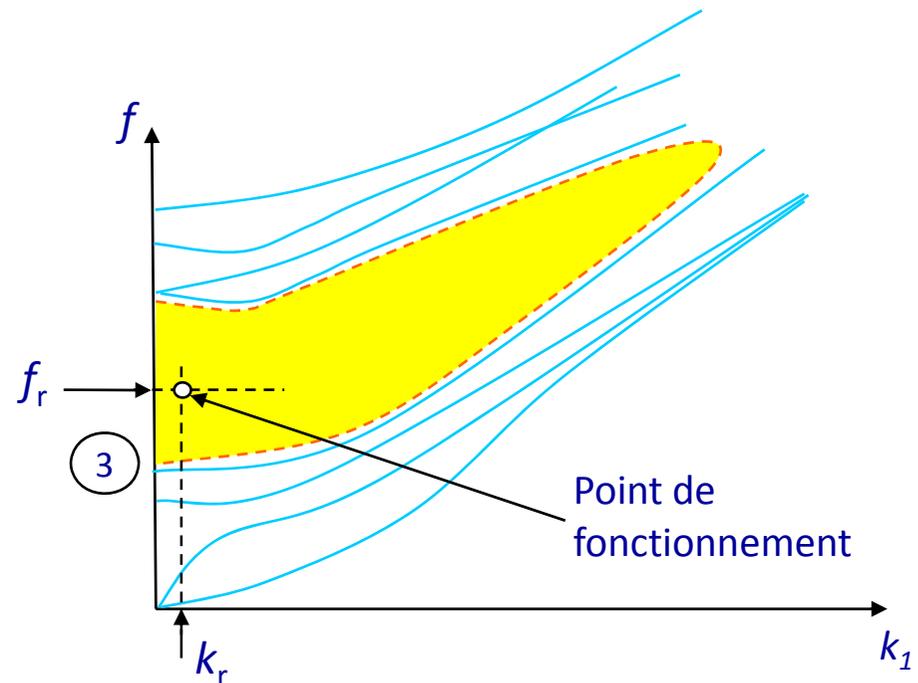
Calculs avec Matlab

Bande d'arrêt du miroir de Bragg

Courbe de dispersion du miroir de Bragg



Courbe de dispersion du miroir de Bragg & Couche piézoélectrique



Légende :

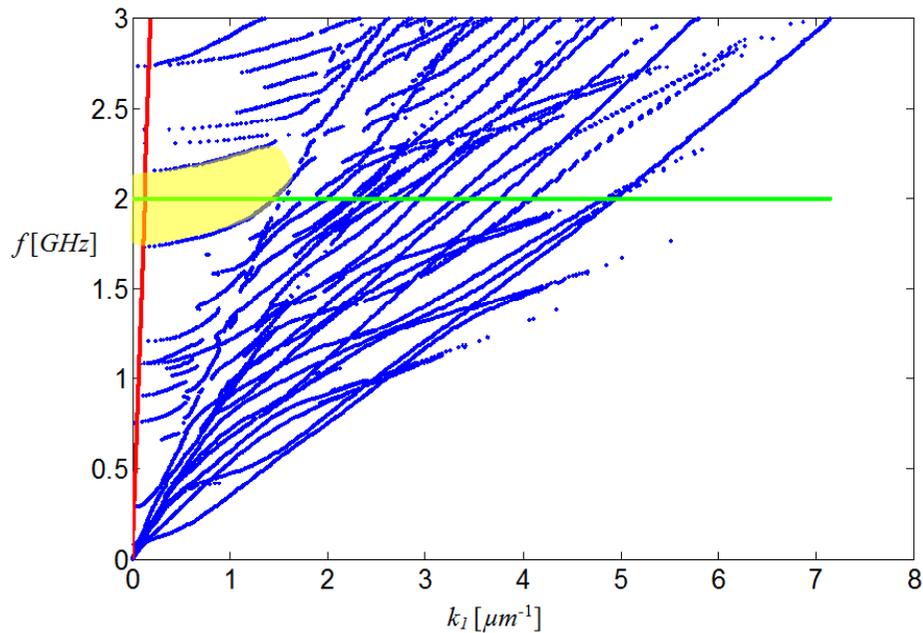
- - - Bande d'arrêt du miroir Bragg
- Modes du miroir de Bragg
- Modes de la couche active

Limites :

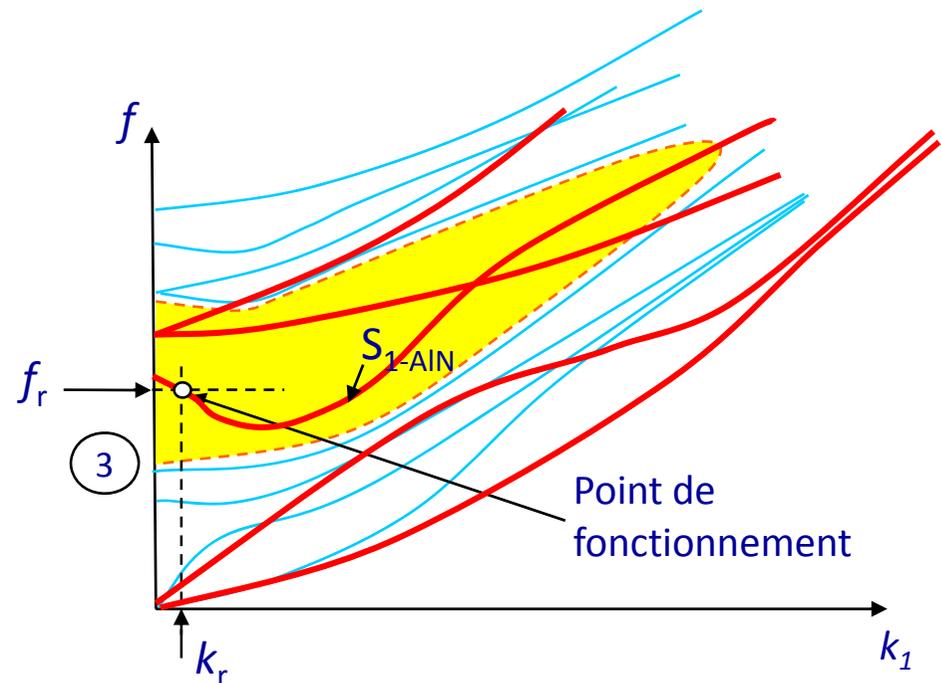
- ③ Epaisseurs des couches du miroir critiques (grandes)

Bande d'arrêt du miroir de Bragg

Courbe de dispersion du miroir de Bragg



Courbe de dispersion du miroir de Bragg & Couche piézoélectrique



Légende :

- - - Bande d'arrêt du miroir Bragg
- Modes du miroir de Bragg
- Modes de la couche active

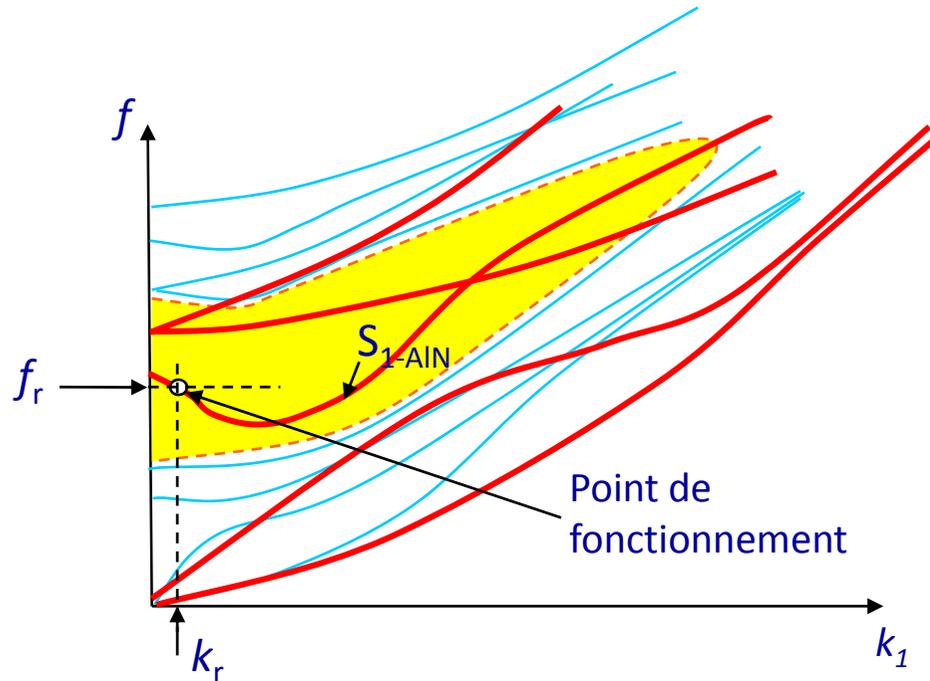
Limites :

- ③ Epaisseurs des couches du miroir critiques (grandes)

Dimensionnement du résonateur

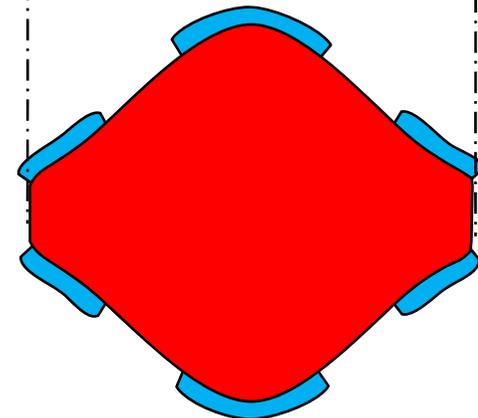
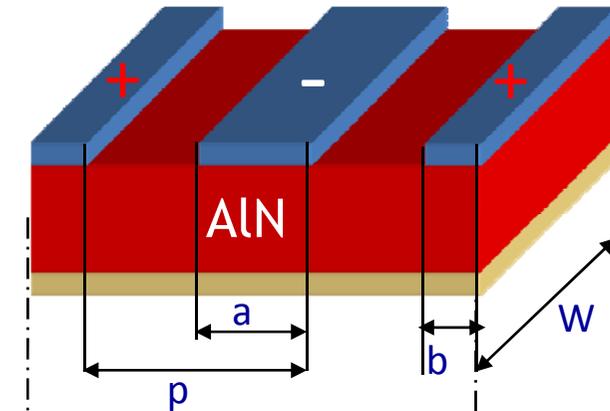
Dimensionnement du résonateur

Calcul des dimensions de la structure à partir de la courbe de dispersion



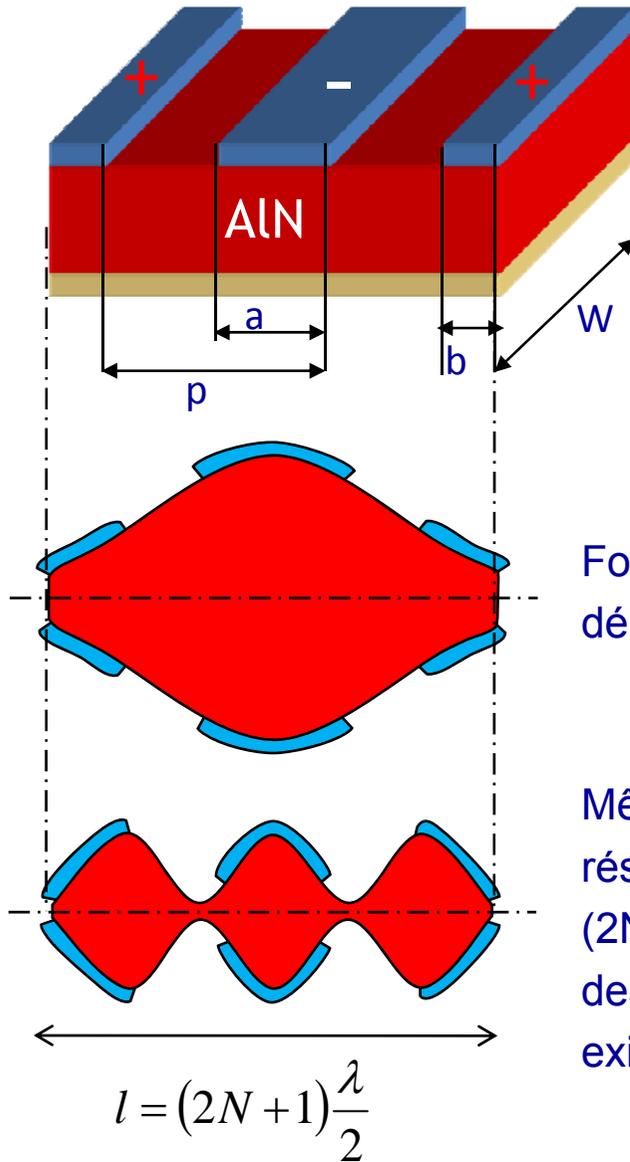
$$\lambda = \frac{2\pi}{k_r} \quad p = \frac{\lambda}{2} \quad a = \frac{\lambda}{4} \quad b = \frac{\lambda}{8}$$

Si a et p vérifient ces relations →
résonance à la fréquence f_r



Forme de
déformation
du mode S_1

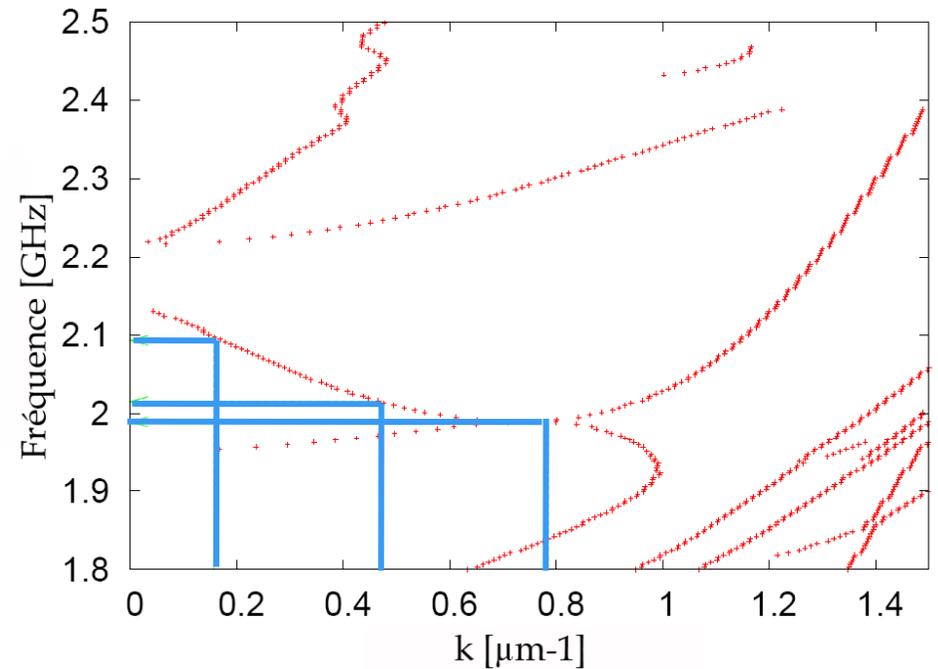
Résonances parasites



Forme des déplacements désirés

Mêmes conditions de résonances : $l = (2N + 1) \lambda / 2 \rightarrow$ Forme des déplacements existants non désirés

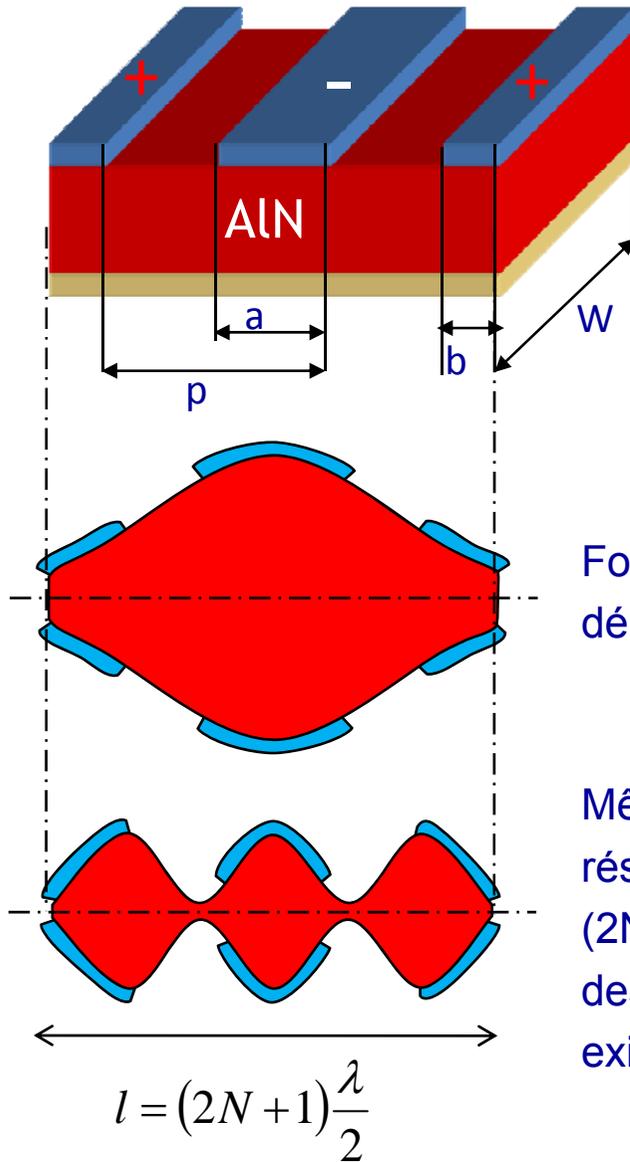
Présence des harmoniques dans l'espace des vecteurs d'onde et des fréquences



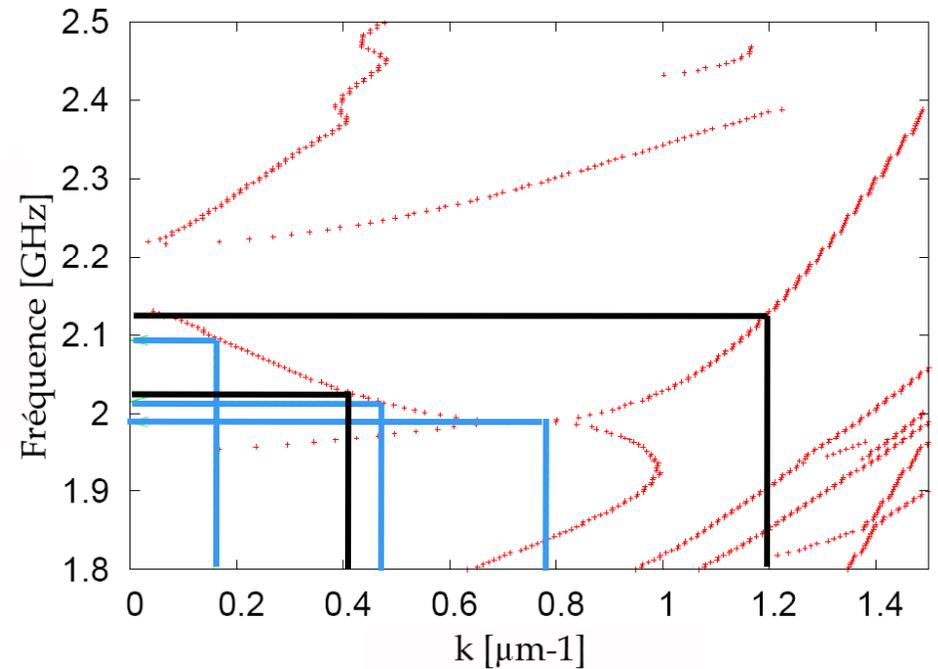
Vecteur d'onde plus grand

\rightarrow Harmoniques plus espacés

Résonances parasites



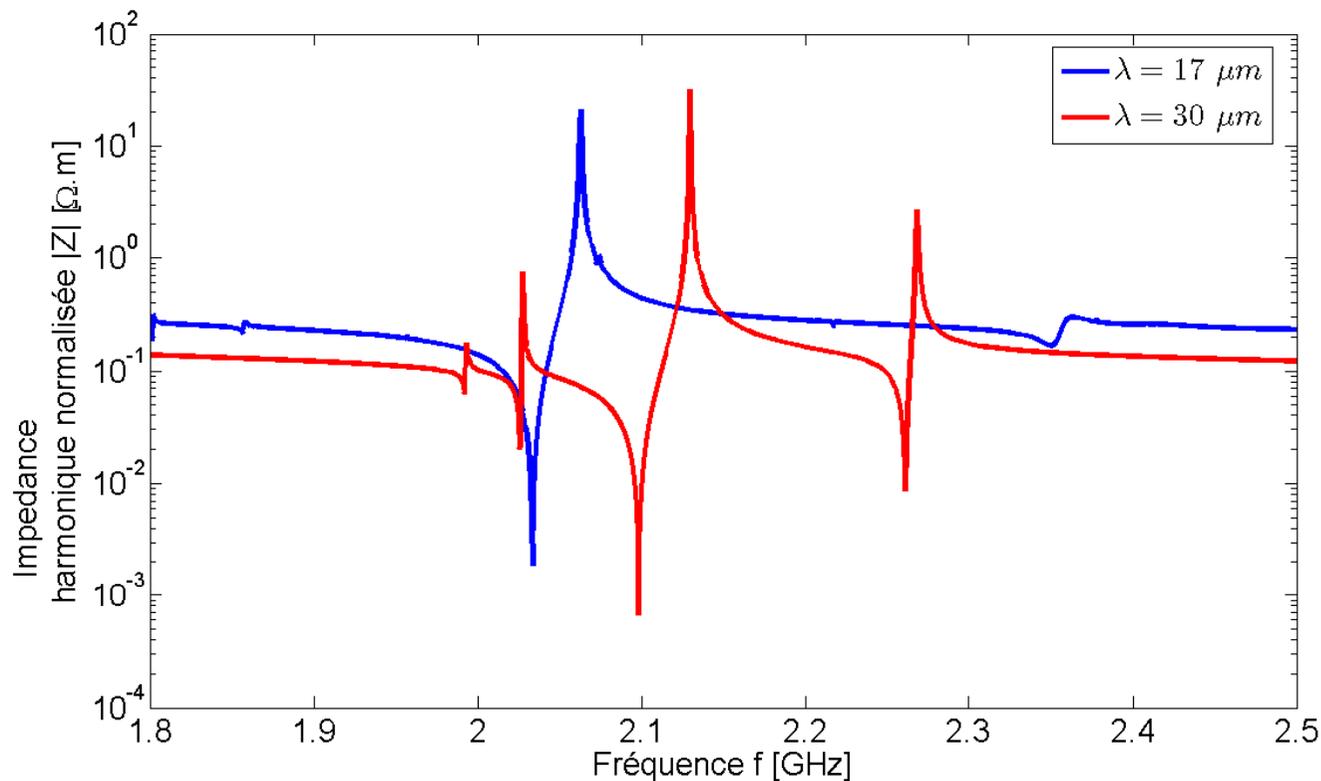
Présence des harmoniques dans l'espace des vecteurs d'onde et des fréquences



Vecteur d'onde plus grand
 → Harmoniques plus espacés

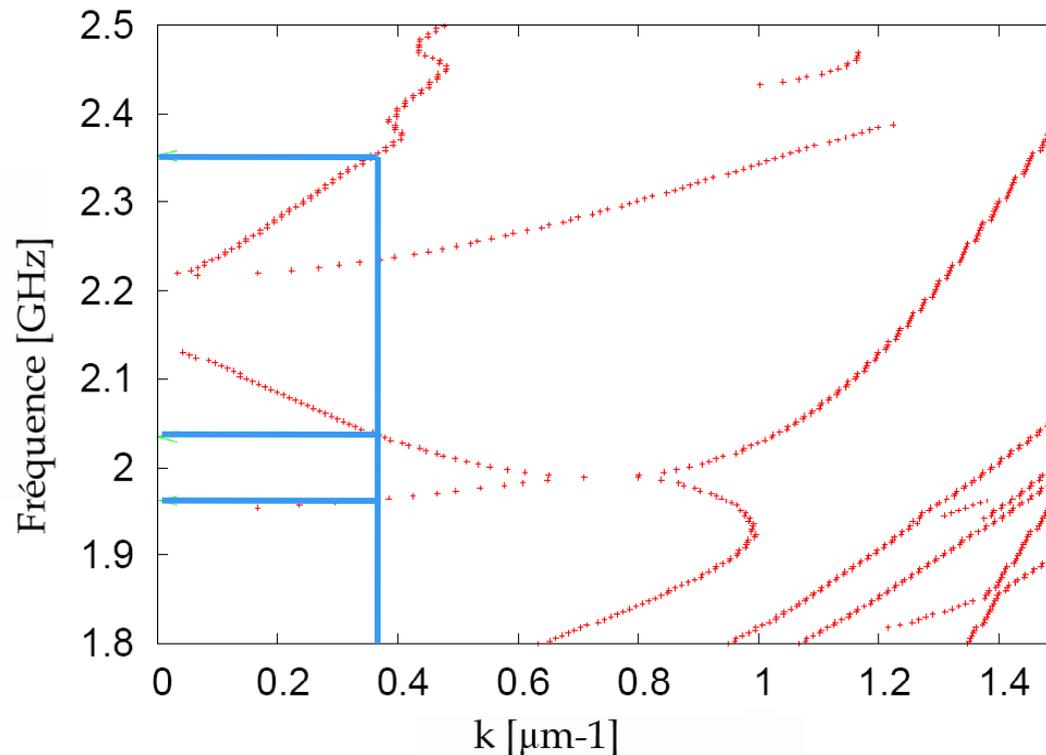
Influence de la longueur

- Plus le vecteur d'onde est grand (donc plus la longueur d'onde est petite) moins il y a de parasites



Parasites provenant des modes

Les modes créent des harmoniques dans l'espace des fréquences



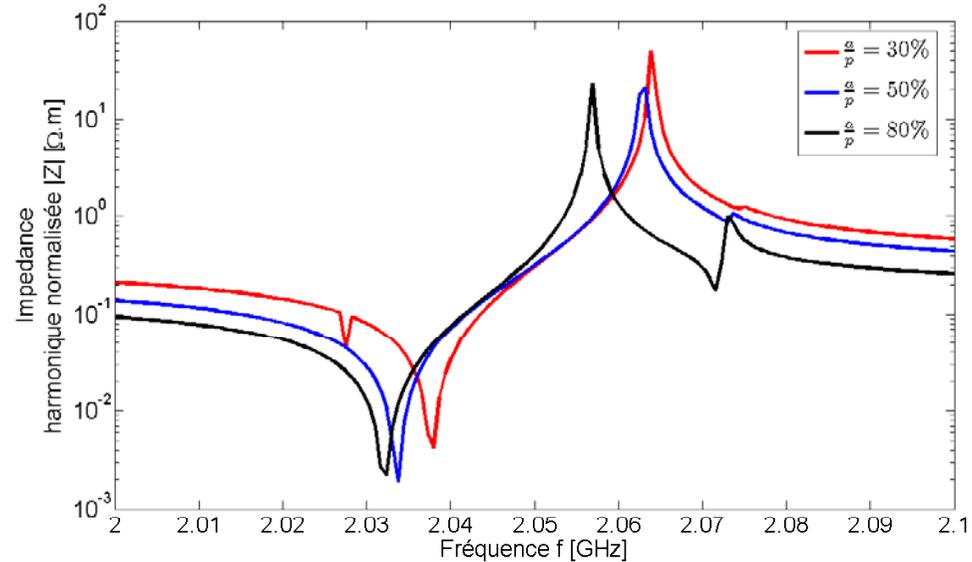
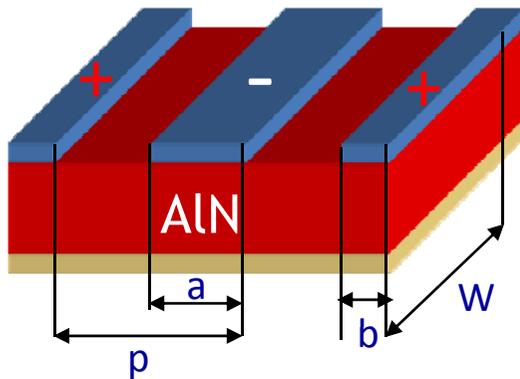
□ Empilement bien conçu →
Minimise ces types de parasites

□ Notamment :

- Dernière couche du miroir de Bragg
- Couche d'AlN

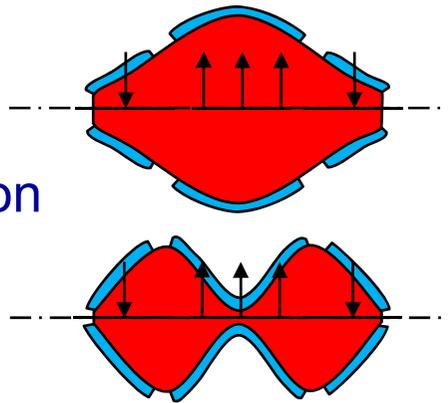
Détermination du rapport de métallisation

Rapport de métallisation →
Apparition des parasites



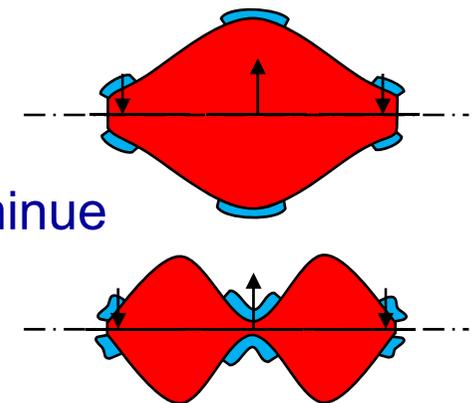
a/p grand :

Champ électrique non
adapté à la
déformation désirée



a/p faible :

Le couplage diminue
sensiblement

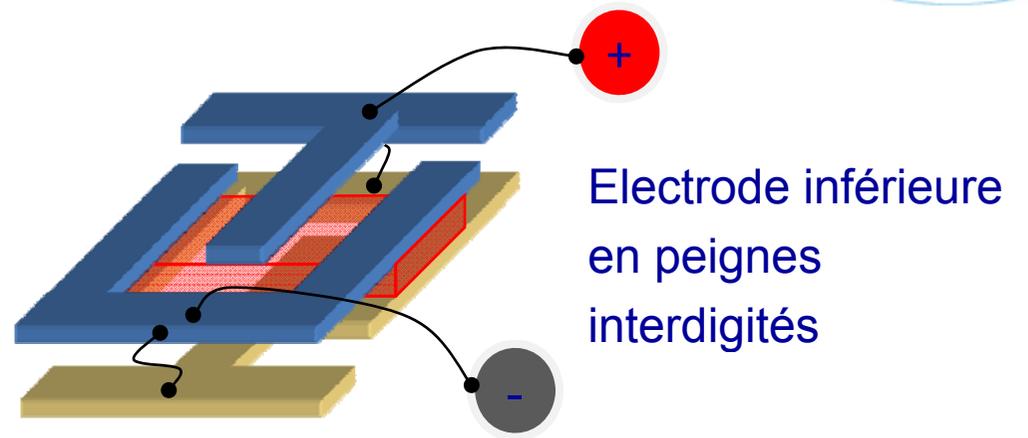
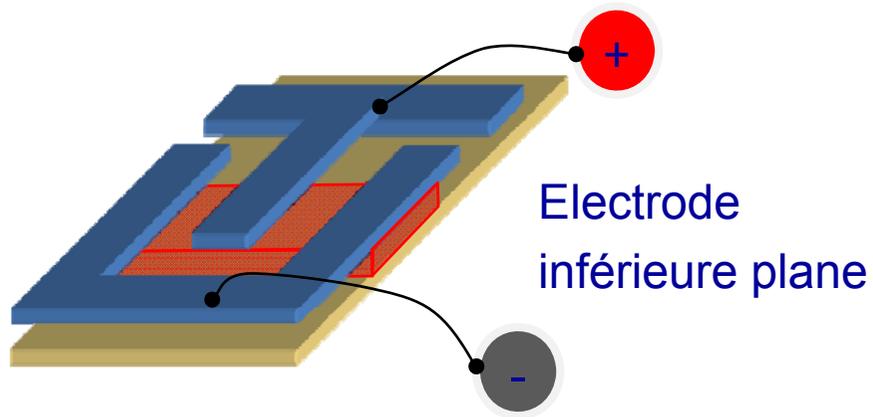


→ Meilleur compromis $a/p = 50\%$

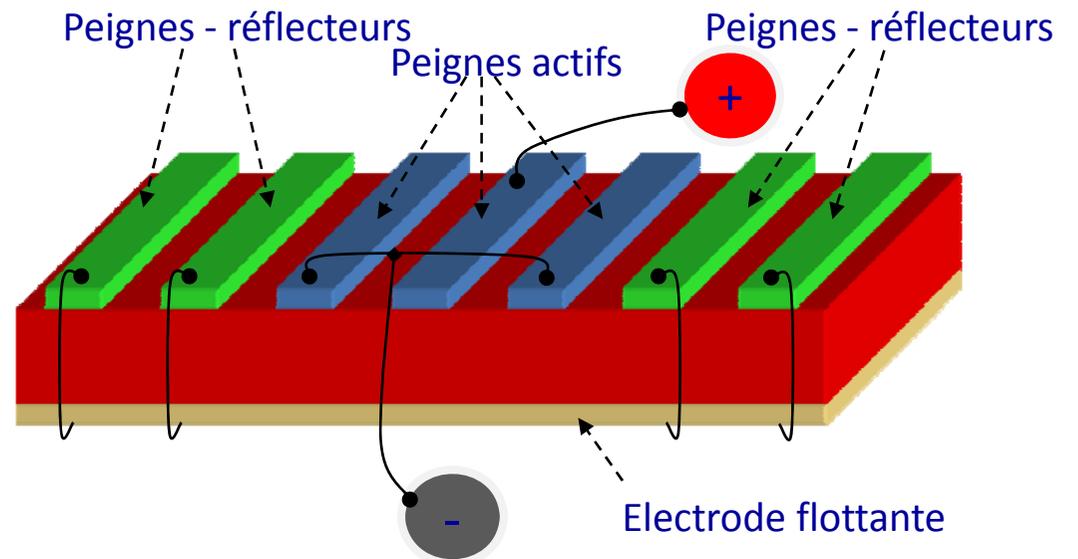
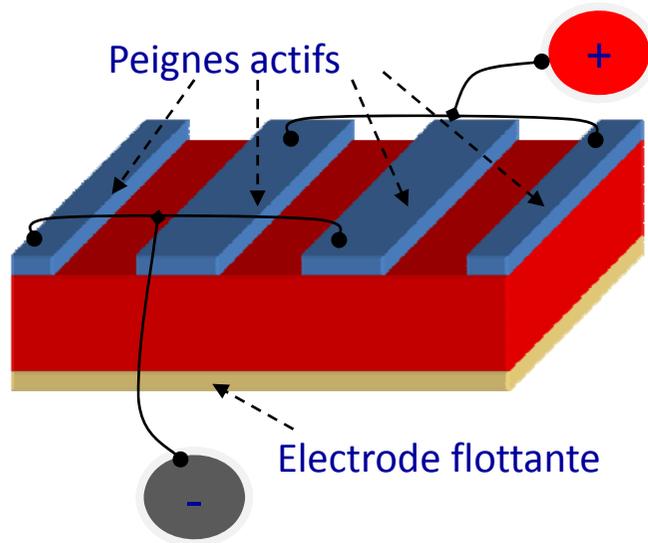
Forme des électrodes

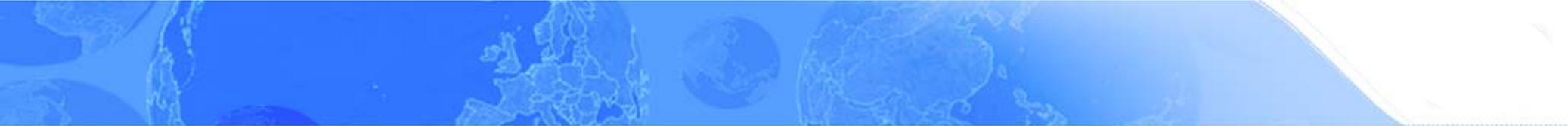
Forme des électrodes

□ Géométrie détaillée



□ Résonance avec gravure d'AlN ou peignes réflecteurs

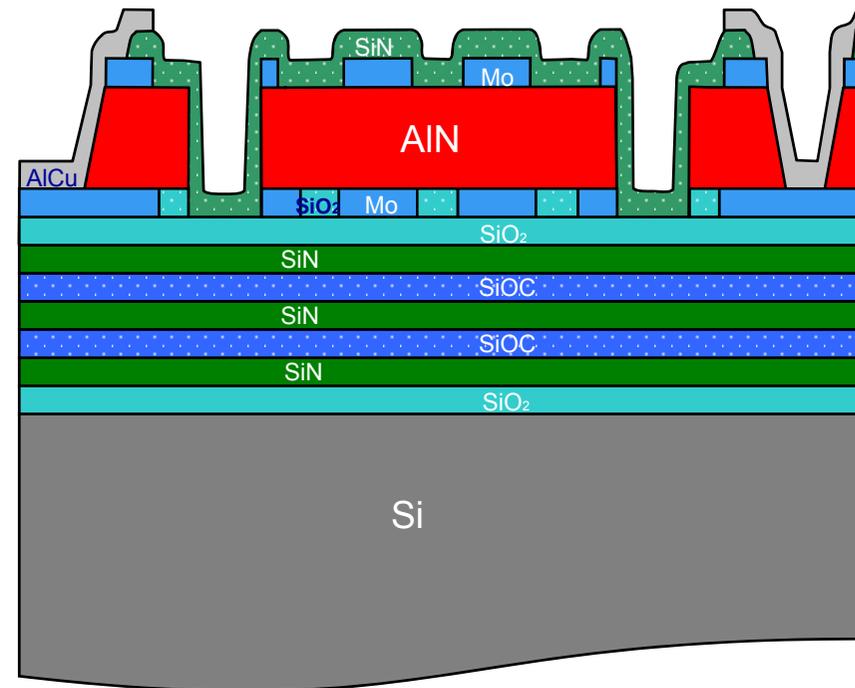
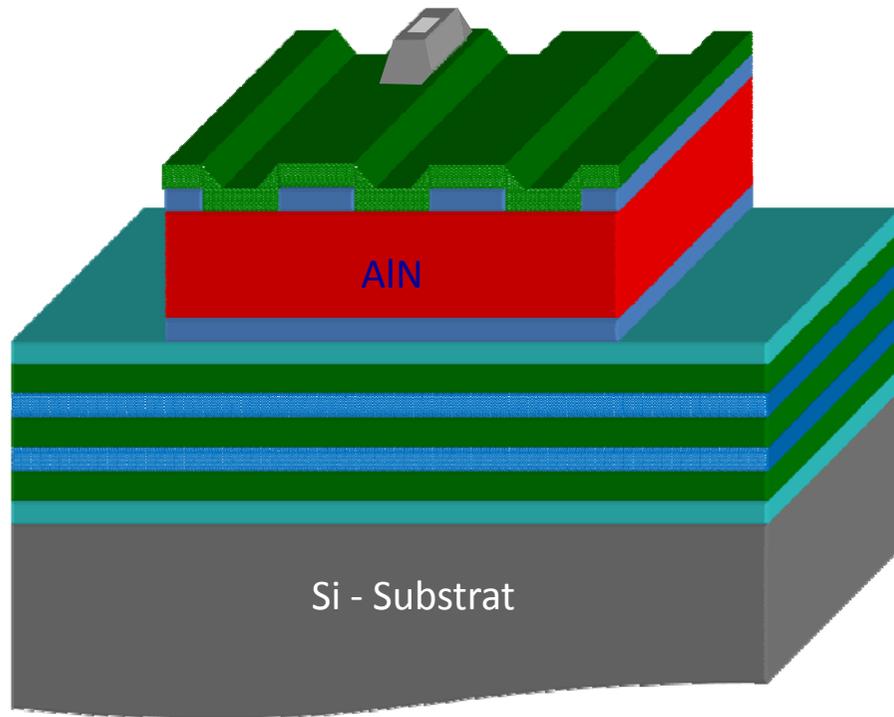




Procédé de fabrication technologique

Empilement technologique du résonateur

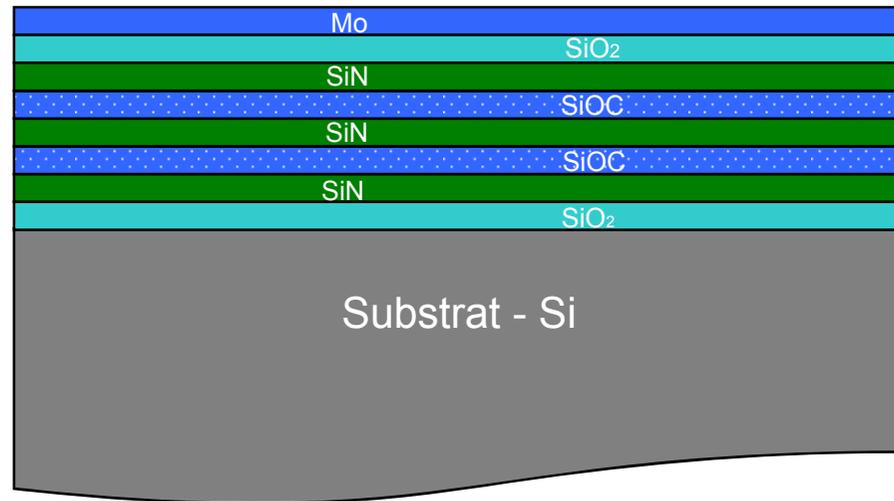
- Empilement très semblable à celui des résonateurs BAW



Dépôt du miroir de Bragg et de l'électrode inférieure

Dépôt de SiO_2
par PECVD

Dépôt de SiOC
par PECVD

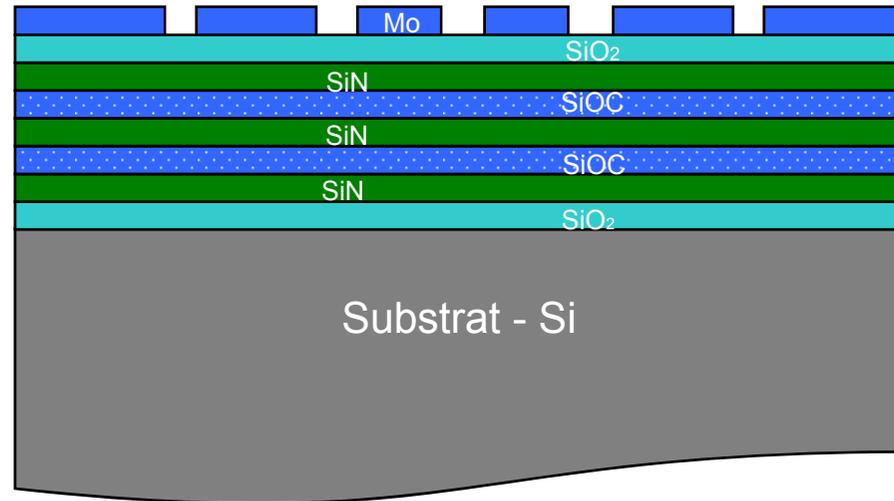


Dépôt de SiN
par PECVD

Dépôt de Mo par
pulvérisation
cathodique

Epaisseurs dans l'intervalle demandée

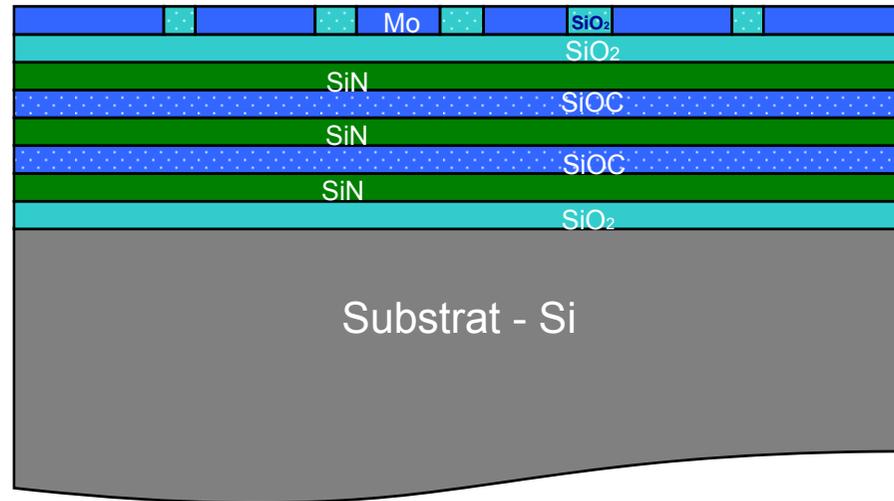
Gravure de l'électrode inférieure



Gravure de l'électrode inférieure :
gravure sèche fluorée

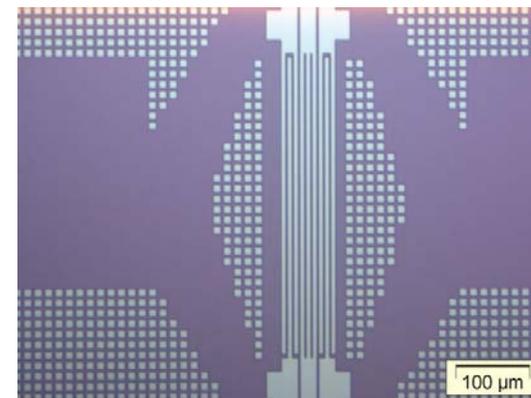
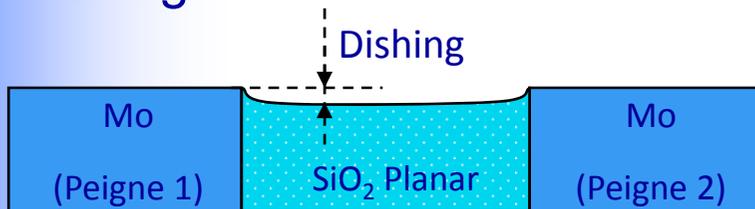
Planarisation de l'électrode inférieure

Dépôt SiO_2 (PECVD) + planarisation de l'électrode inférieure (CMP) →
Développement spécifique pour cette thèse

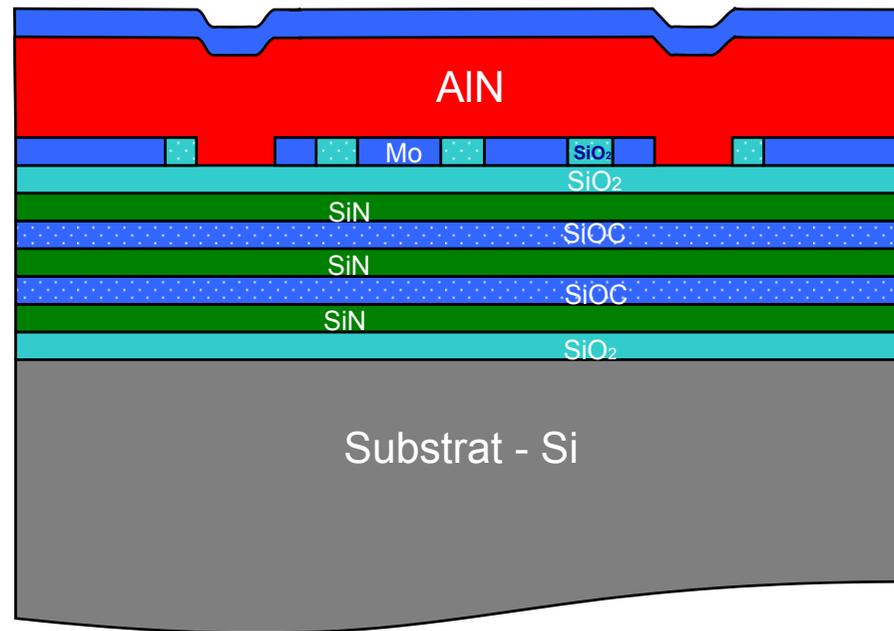


La planarisation n'est pas parfaite
→ Dishing

Les « dummies » servent à minimiser le dishing

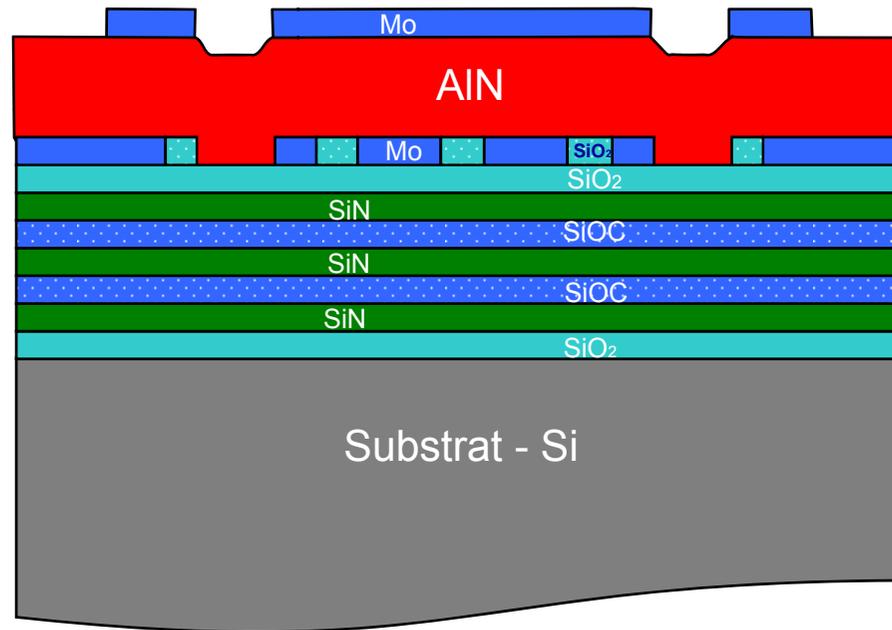


Dépôt de l'AlN et de l'électrode supérieure



- ❑ Dépôt de la couche piézoélectrique (AlN) par pulvérisation DC pulsée
- ❑ Dépôt de l'électrode supérieure par pulvérisation cathodique

Gravure de l'électrode supérieure (Mo)

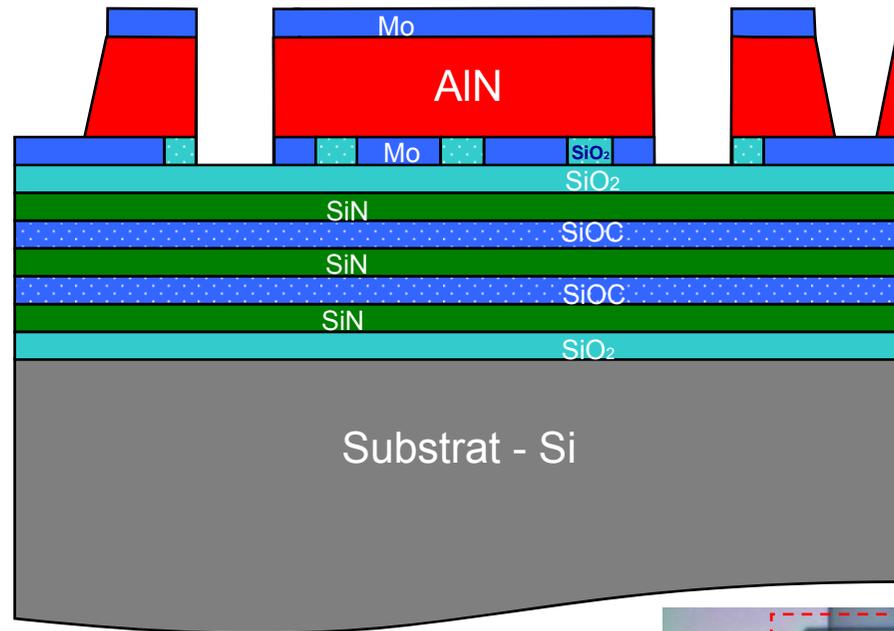
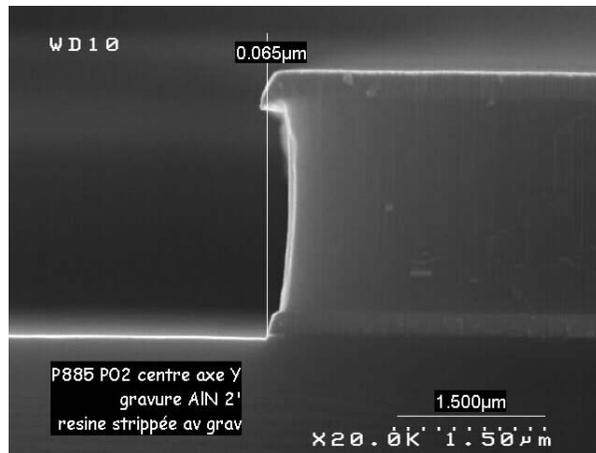


Ouverture des piscines et des vias de connexion électriques

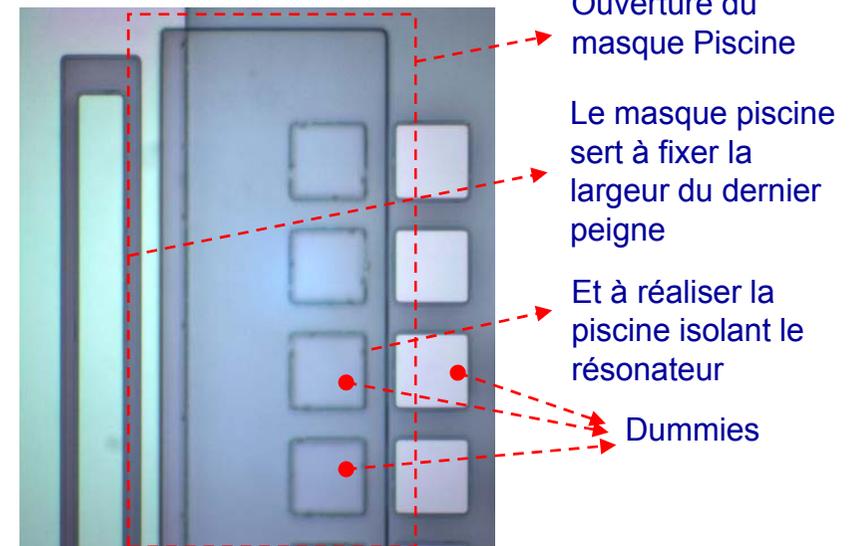
Gravure de la couche piézoélectrique (AlN)

L'AlN est gravé dans un bain chimique de H_3PO_4

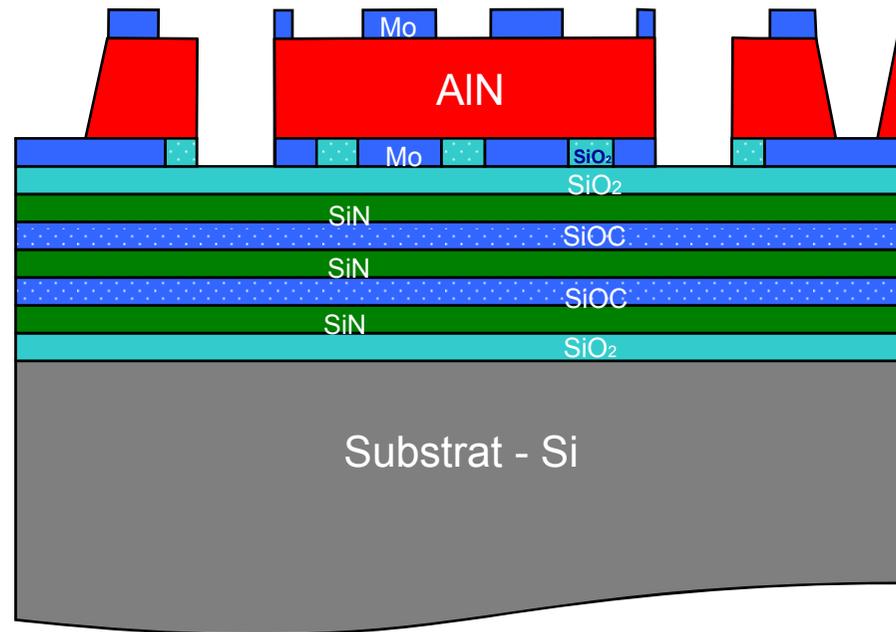
☐ Photographie au microscope du flanc de l'AlN



Ouverture des piscines et des vias de connexion électrique

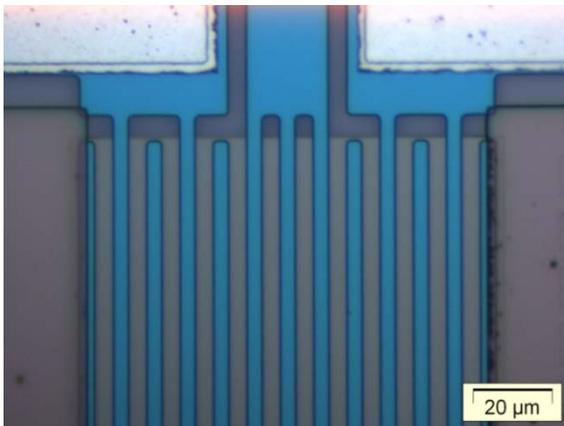


Deuxième gravure de l'électrode supérieure

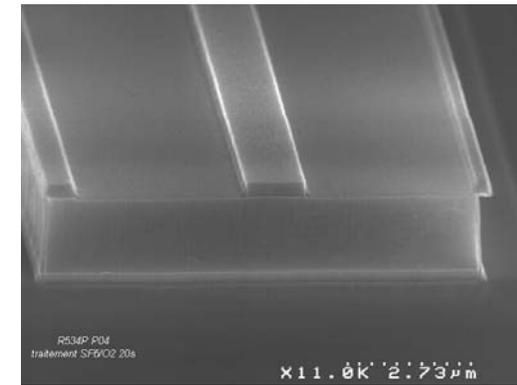
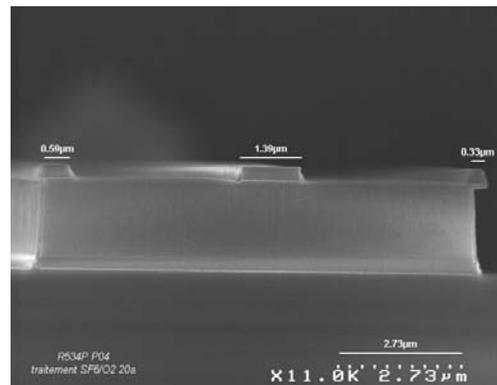


Cette gravure définit les peignes interdigités de l'électrode supérieure

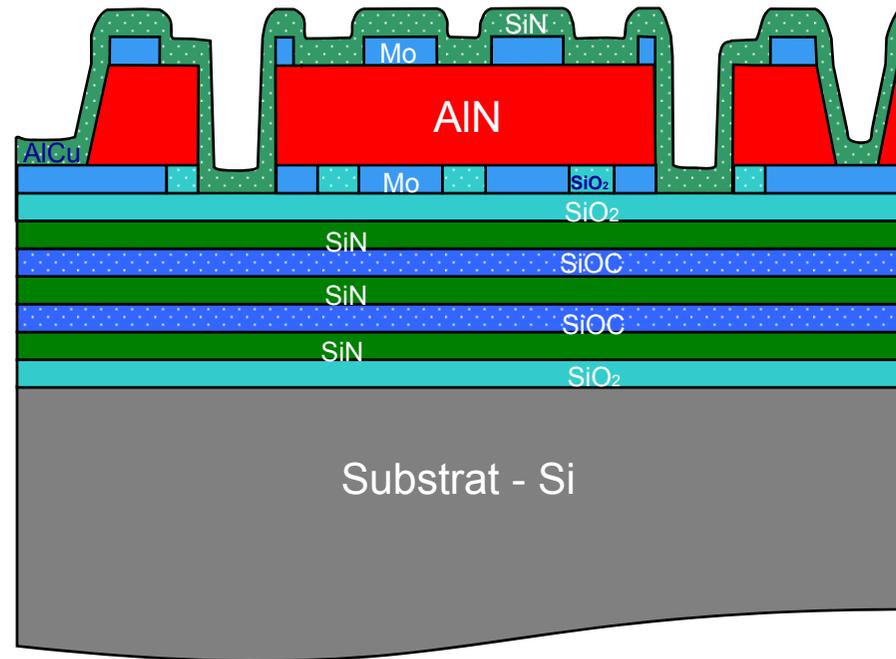
Vue de dessus des peignes gravés



Problème de sur-gravure et de désalignement entre l'électrode supérieure et inférieure → peignes plus petits → parasites

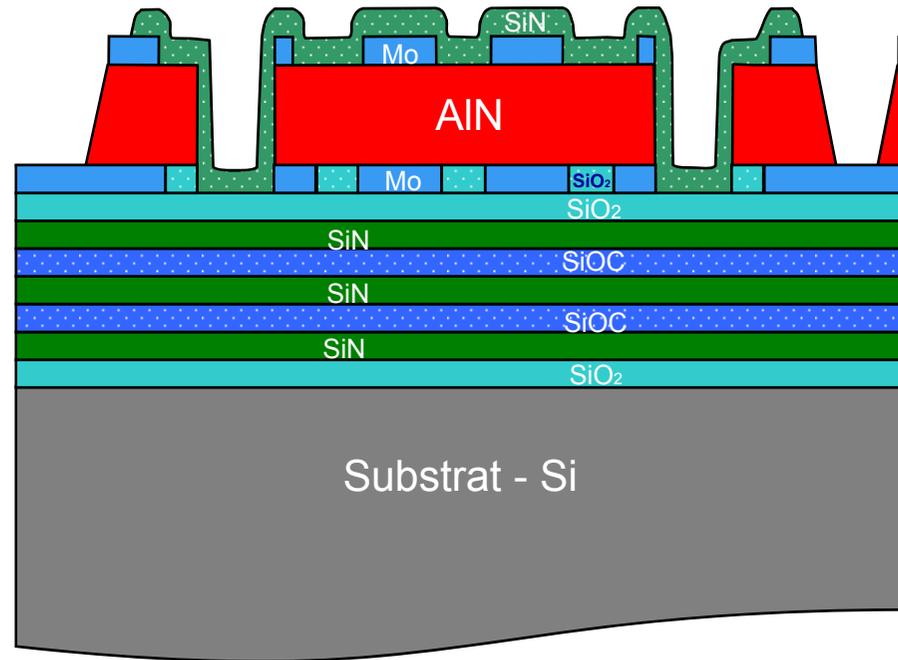


Dépôt de la couche de passivation (SiN)

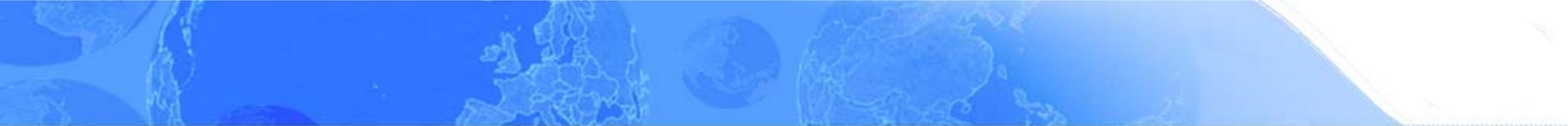


Dépôt de la couche de passivation en SiN par PECVD

Gravure de la couche de passivation (SiN)



La couche de passivation est gravée par gravure sèche au niveau des lignes d'accès et des connexions



Caractérisation des composants

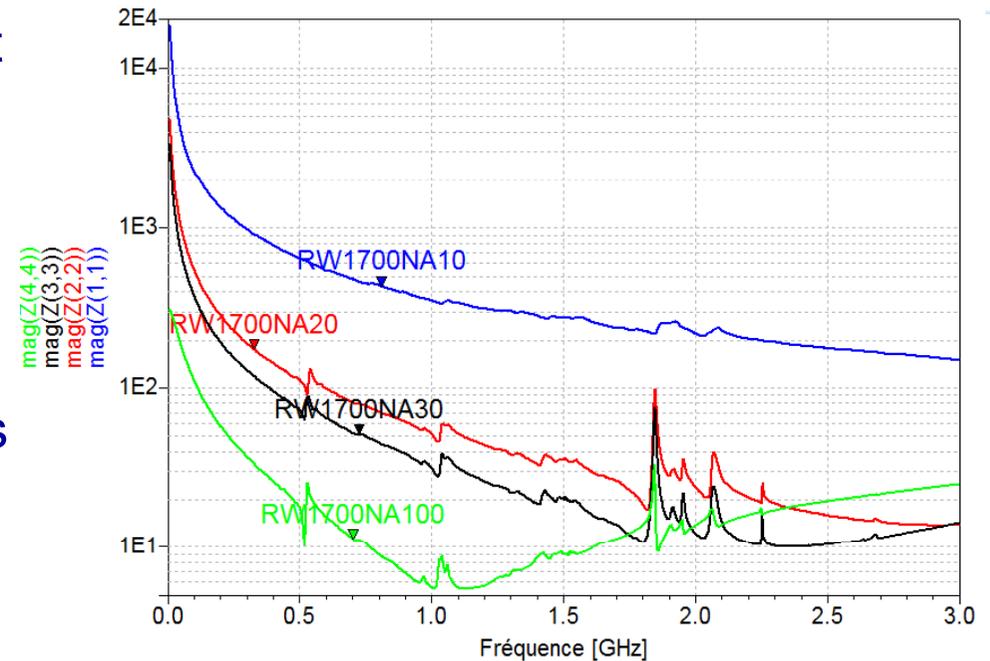
Mesures électriques brutes

- ❑ La calibration tient compte uniquement des erreurs provenant du système de mesure
- ❑ Mesure brute → La capacité vient du dispositif
- ❑ Mesure brute → L'inductance vient des lignes de connexion très longues



Nécessité de « de-embedding »

- ❑ Parasites
 - Sur-gravure et désalignement des électrodes
 - Résidu de SiN non gravé au fond des vias



Mesures électriques brutes

- ❑ La calibration tient compte uniquement des erreurs provenant du système de mesure
- ❑ Mesure brute → La capacité vient du dispositif
- ❑ Mesure brute → L'inductance vient des lignes de connexion très longues



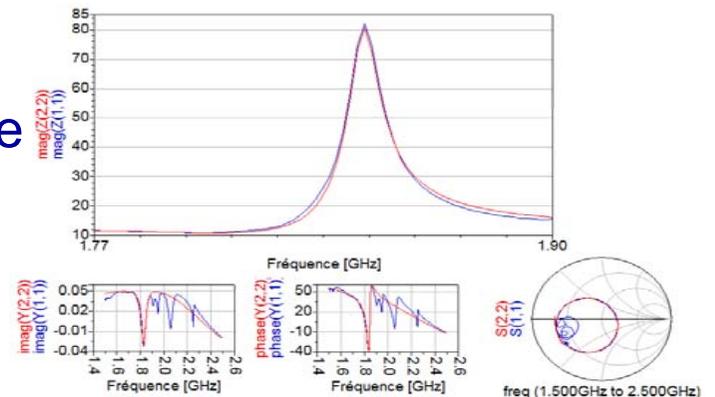
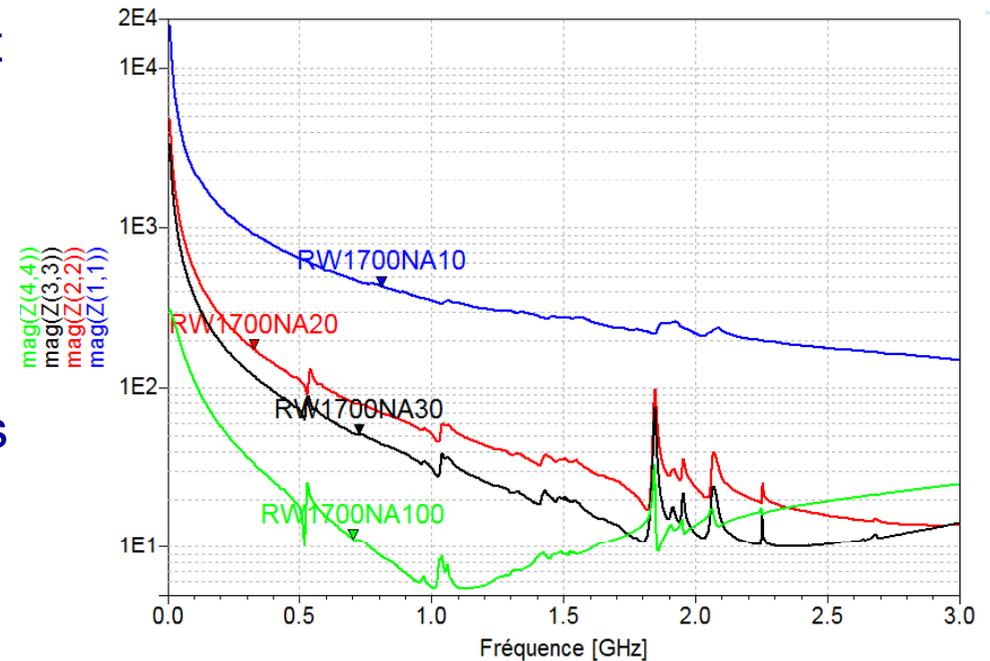
Nécessité de « de-embedding »

❑ Parasites

- Sur-gravure et désalignement des électrodes
- Résidu de SiN non gravé au fond des vias

❑ L'ajustement (« fit ») des mesures électriques avec le modèle équivalent permet d'extraire Q , k^2 , F_s , F_p :

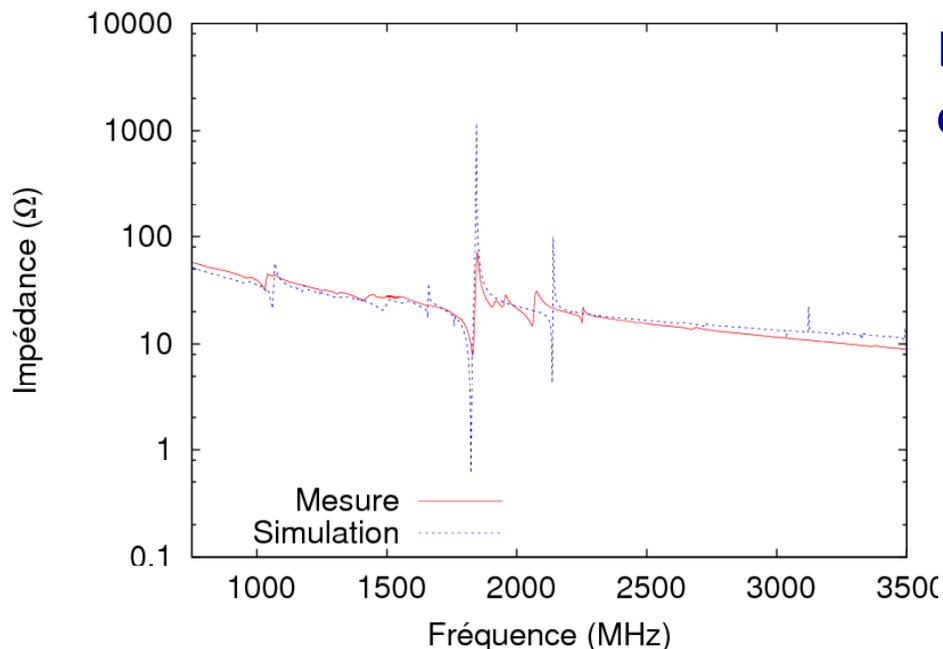
$$C_0 = C_{BF} \left(\frac{F_s}{F_p} \right)^2, \quad C_m = C_{BF} - C_0, \quad L_m = \frac{1}{C_m (2\pi F_s)^2}, \quad R_m = \frac{L_m 2\pi F_s}{Q}$$



Analyse des mesures électriques

	Mesure non « deembeddée »	Mesure « deembeddée »	
NA 30 30 peignes	F_R [GHz]	1.803	1.829
	F_A [GHz]	1.844	1.845
	Q_S	23	162
	Q_P	188	205
	k^2 [%]	5.61	2.16

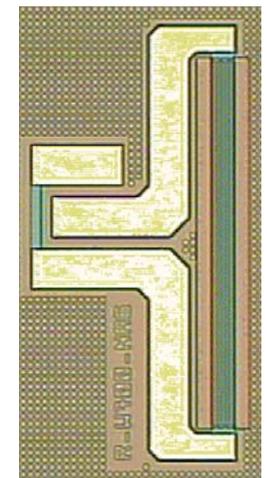
□ Q_S et k_t^2 changent sensiblement en fonction du « deembedding » → effet inductif et résistif important des lignes de connexion



□ Accord théorie / expérience correct

- Parasites prévus mais positions à ajuster
- Parasites supplémentaires : contribution mécanique des électrodes

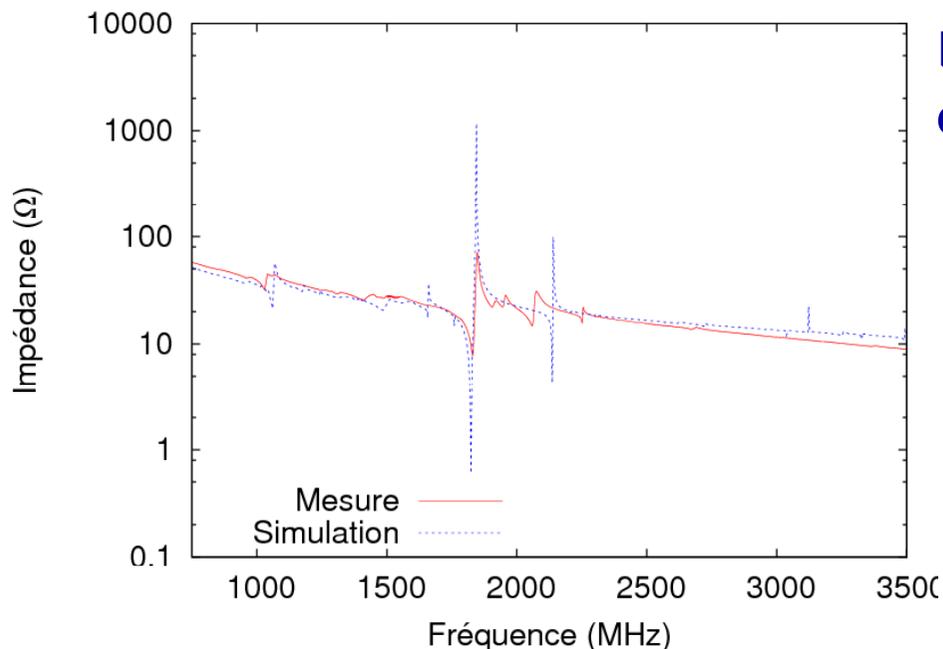
Photographie optique d'un résonateur



Analyse des mesures électriques

	Mesure non « deembeddée »	Mesure « deembeddée »	
NA 30 30 peignes	F_R [GHz]	1.803	1.829
	F_A [GHz]	1.844	1.845
	Q_S	23	162
	Q_P	188	205
	k^2 [%]	5.61	2.16

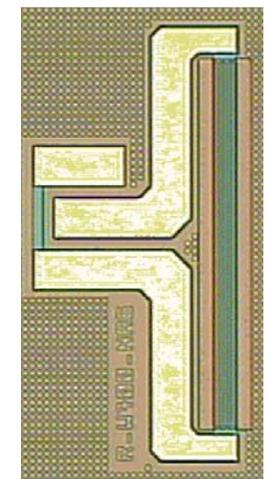
□ Q_S et k_t^2 changent sensiblement en fonction du « deembedding » → effet inductif et résistif important des lignes de connexion



□ Accord théorie / expérience correct

- Parasites prévus mais positions à ajuster
- Parasites supplémentaires : contribution mécanique des électrodes

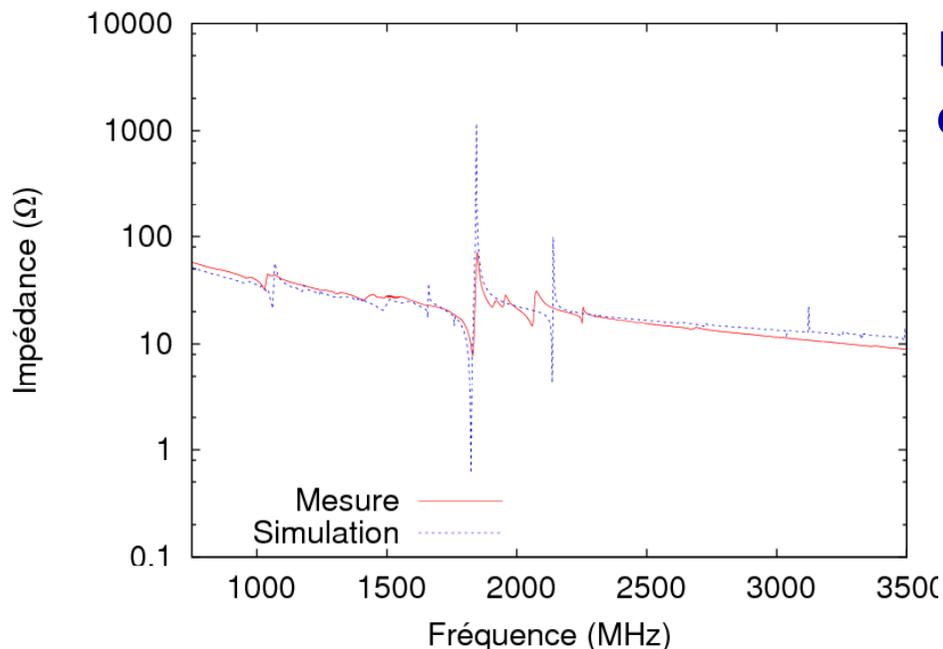
Photographie optique d'un résonateur



Analyse des mesures électriques

	Mesure non « deembeddée »	Mesure « deembeddée »
F_R [GHz]	1.803	1.829
F_A [GHz]	1.844	1.845
Q_S	23	162
Q_P	188	205
k^2 [%]	5.61	2.16

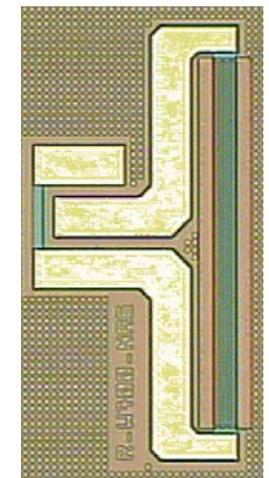
□ Q_S et k_t^2 changent sensiblement en fonction du « deembedding » → effet inductif et résistif important des lignes de connexion



□ Accord théorie / expérience correct

- Parasites prévus mais positions à ajuster
- Parasites supplémentaires : contribution mécanique des électrodes

Photographie optique d'un résonateur



Analyse des mesures électriques

Résonateur	F_R [GHz]	F_A [GHz]	Q_S	Q_P	k_t^2 [%]
NA20	1.830	1.845	166	168	2.02
NA30	1.829	1.845	162	205	2.16
NA100	1.858	1.845	77	205	1.73

Résonateur IF haute fréquence

Yantchev 2007

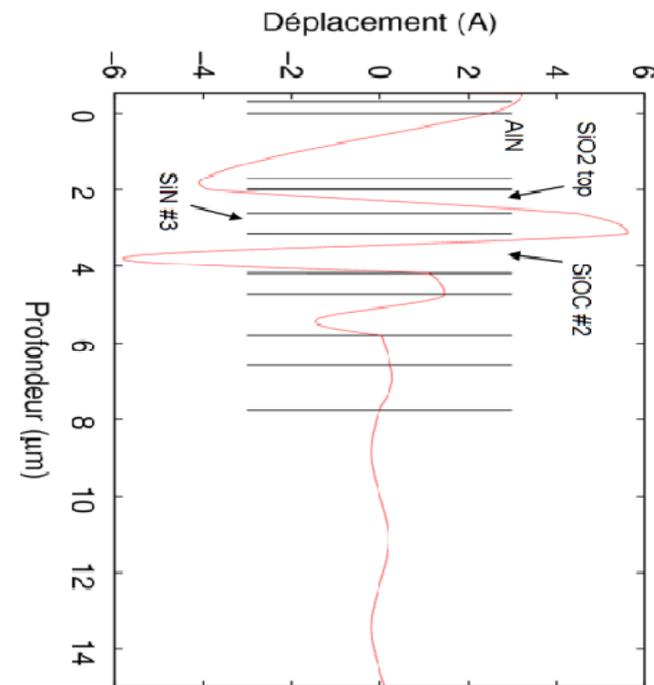
$F = 885$ MHz

$Q = 3000$

$k^2 = 0.18$ %

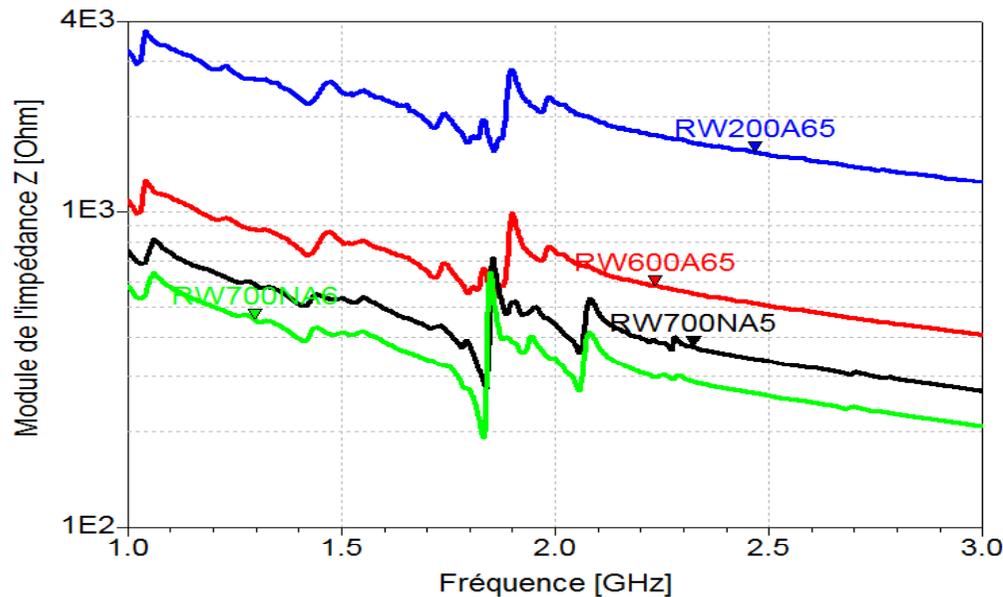
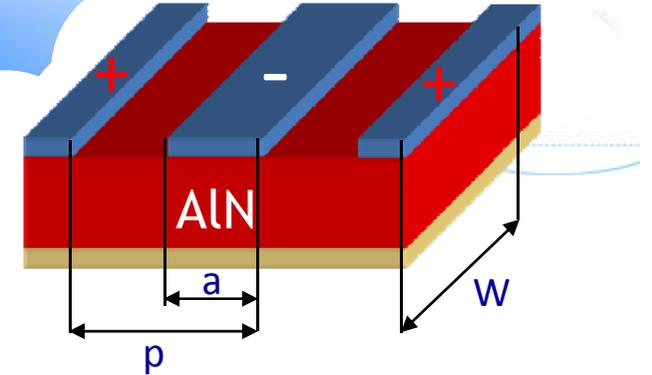
□ Q_S faible →

- Effet résistif et inductif des lignes de connexion
- Perte matériau important dans la première couche de SiOC du miroir de Bragg
→ Plus judicieux de remplacer le SiOC par un autre matériau



$F_S \sim 2$ GHz et k^2 de 1.5 % à 2.2 % → Convenables pour le filtrage IF en bande haute

Influence de la longueur du résonateur et de la longueur d'onde

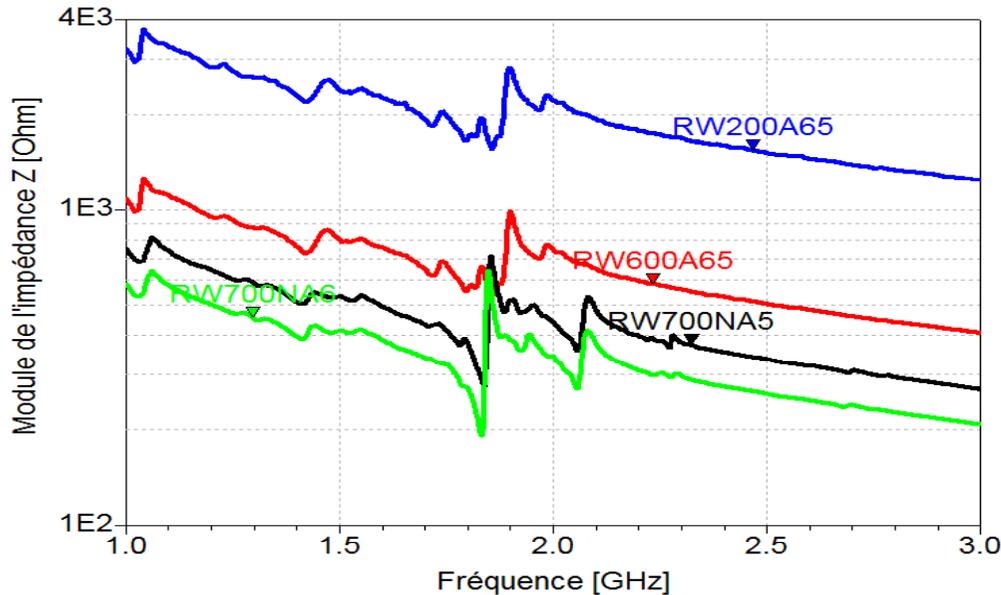
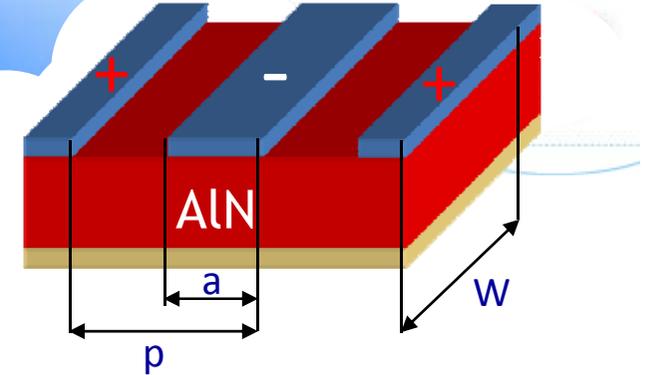


- Variation de la longueur W :
 - Translation des courbes
 - Peignes longs → Capacité statique grande → Impédance d'entrée du résonateur faible

	p [μm]	a [μm]	F_s [MHz]
R-P5-A24	5	2.4	1 880
R-P7-A34	7	3.4	2 200
R-P10-A5	10	5	1 800

- Variation de la longueur d'onde λ :
 - Variation des fréquences conformément aux courbes de dispersion

Influence de la longueur du résonateur et de la longueur d'onde



- Variation de la longueur W :
 - Translation des courbes
 - Peignes longs \rightarrow Capacité statique grande \rightarrow Impédance d'entrée du résonateur faible

	p [μm]	a [μm]	F_s [MHz]
R-P5-A24	5	2.4	1 880
R-P7-A34	7	3.4	2 200
R-P10-A5	10	5	1 800

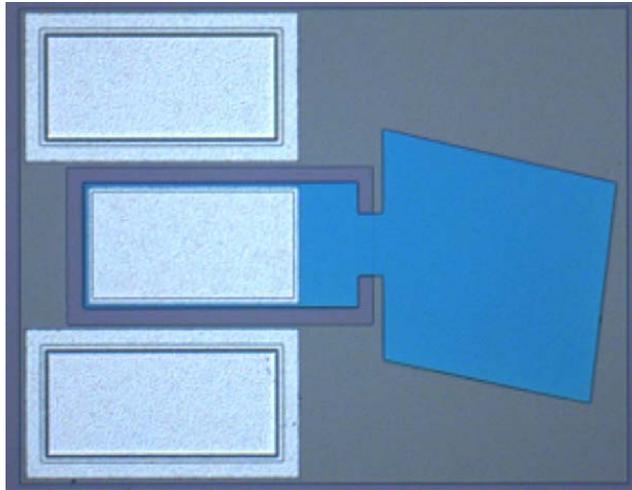
- Variation de la longueur d'onde λ :
 - \rightarrow Variation des fréquences conformément aux courbes de dispersion



Important : permet de fabriquer des résonateurs de fréquences différentes (multi-fréquence) dans la même puce

Résonateurs BAW co-intégrés avec les dispositifs à ondes guidées

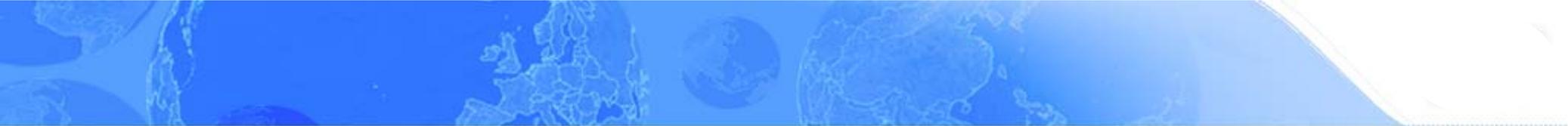
Photographie optique d'un résonateur BAW co-intégré



- ❑ Résonateurs BAW co-intégrés **fonctionnels**
- ❑ Pertes citées dans le transparent précédent → facteur de qualité est plus faible

La conception du miroir a été optimisée uniquement pour les résonateurs à ondes guidées

Dispositif	Type	F_R [MHz]	k_t^2 [%]	Q
Résonateurs BAW CEA/Leti	Miroir de Bragg	2 140	6	800 – 1000
Résonateur BAW co-intégré (cette thèse)	Miroir de Bragg	1 846	1.8	250



Conclusion

Conclusion

- ❑ La faisabilité des résonateurs à ondes acoustiques guidées sur miroir de Bragg est démontrée
 - Possibilité de fixer les paramètres de fonctionnement par la géométrie → multi-standards dans une même puce
 - Applications de filtrage de canal en bande haute
- ❑ Etude de deux méthodes pour isoler les ondes, l'utilisation du miroir de Bragg est plus adaptée à la gamme de fréquence utilisée
 - Proposition d'une méthodologie systématique de recherche d'épaisseurs optimales pour assurer une transmission minimale du miroir de Bragg
 - Etude de la minimisation des résonances parasites
- ❑ Un procédé de fabrication fonctionnel très similaire à celui des résonateurs BAW
 - Développements spécifiques de l'étape de planarisation de l'électrode inférieure et de la gravure à flanc vertical de la couche piézoélectrique.
- ❑ Performances électriques :
 - Facteur de qualité $Q = 205$
 - Coefficient de couplage $k^2 = 2.16 \%$
 - Fréquence $F_R = 1.8 \text{ GHz}$
- ❑ Résonateurs BAW co-intégrés fonctionnels
- ❑ Aspect multifréquence validé → Résonateurs de 1.8 à 2.2 GHz réalisés

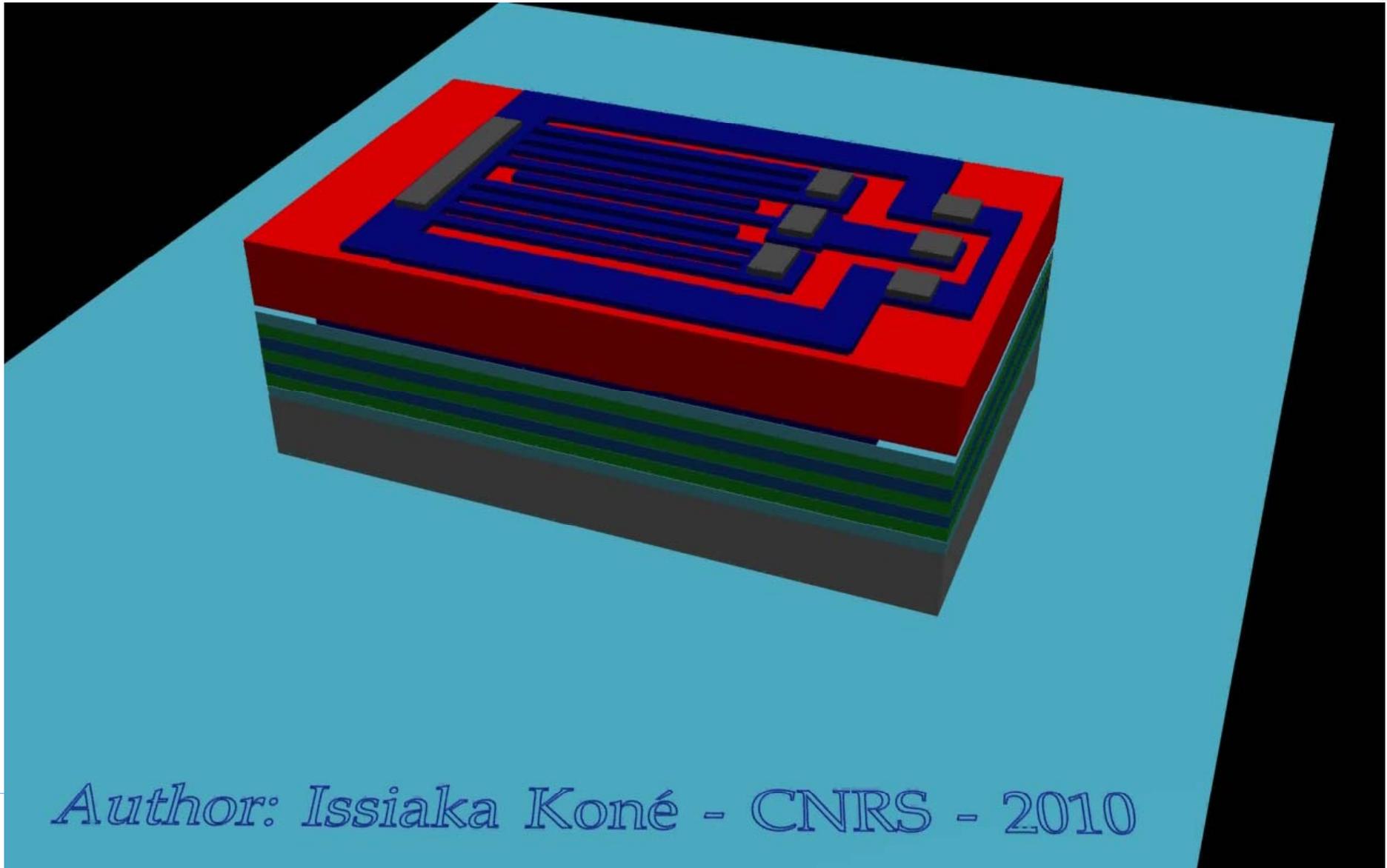
❑ Améliorations court terme

- Adapter les lignes de connexion à la propagation du signal RF : diminuer l'inductance parasite
- Adaptation en impédance (critique pour les filtres)
- Re-design du miroir de Bragg (choix d'autres matériaux)
- Etude de l'influence mécanique de la métallisation sur la propagation des ondes acoustiques
- Etude du nombre de peignes

❑ Perspectives à moyen terme

- Viser une spécification particulière
- Etudes de la fiabilité, tenue en puissance et stabilité en température
- Intégration du composant dans une chaîne d'émission/réception RF → Etude de l'impact sur le circuit global
- Conception d'un émetteur/récepteur multistandard co-intégrant dans une même puce, des résonateurs BAW-SMR et des résonateurs à ondes acoustiques guidées

Géométrie optimisée du résonateur



Author: Issiaka Koné - CNRS - 2010

Dispositif optimisé

Je remercie ...

Mon encadrant CEA-Leti Alexandre **Reinhardt** tant pour ses qualités humaines que professionnelles

Mes encadrants STMicroelectronics Fabrice **Casset** et Alexandre **Volatier** qui m'ont choisi pour cette thèse

Mes directeurs de thèse, Bertrand **Dubus** et Lionel **Buchaillet**

Mon encadrant STMicroelectronics Jean-Francois **Carpentier**

Pascal **Ancey**, chef de l'équipe Advanced R&D (Derivative & 3D) de STMicroelectronics, Jean-Benoist **Duburcq**

chef du département ISEN de l'IEMN et Marc **Aïd** chef du laboratoire LCRF

L'équipe BAW du LCRF : Guy **Parat**, Pierre-Patrick **Lassagne**, Denis **Pellissier-Tanon**, Sylvain **Joblot**, Rémi **Velard**, Michel **Borel**, Nicolas **Buffet**, Barbara **Glueck**, Thierry **Claret**, Eric **Saint-Etienne** et Emmanuel **Denis**

Frédéric **Domingue** tant pour ses qualités humaines que professionnelles

Hélène **Jacquinot**

Pascal **Mosbah**

Didace **Ekeom**

Olivier **Gully**

Marie **Gorisse**

François **Chapuis**, Matthieu **Desvergne** et Luis **Lolis**

Mamadou **Diarra**

Aude **Lefèvre**, Sébastien **Soulan**, Anastasia **Delattre**, Tatiana **Pinedo Rivera**, Jean-Raoul **Plaussu**

Christine **Courtois** (Secrétaire LCRF), Christel **Sethi** (Secrétaire ISEN), Evelyne **Montmayeul** (Secrétaire Derivative & 3D)

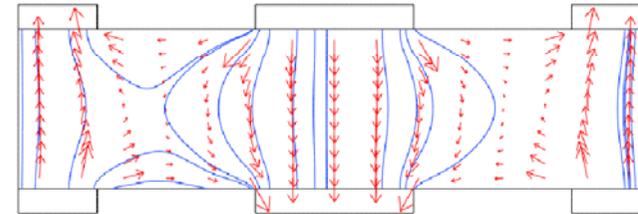
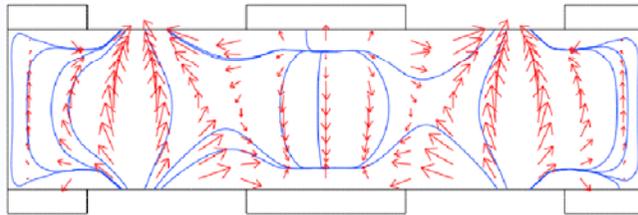
Je remercie tous mes ami(e)s, collègues, thésards, techniciens, ingénieurs,

responsables de STMicroelectronics, de l'ISEN, du LCRF, du LCMS et du LTM du CEA-Leti

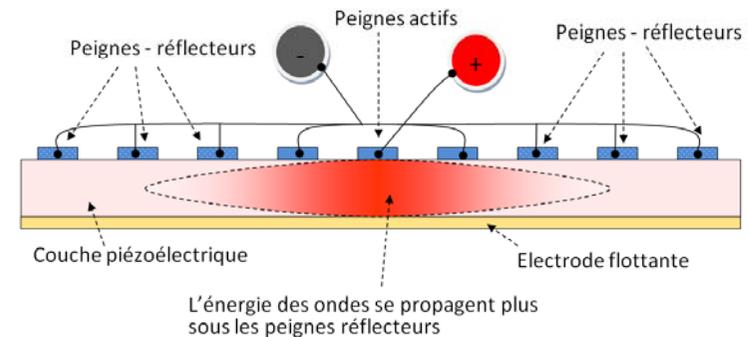
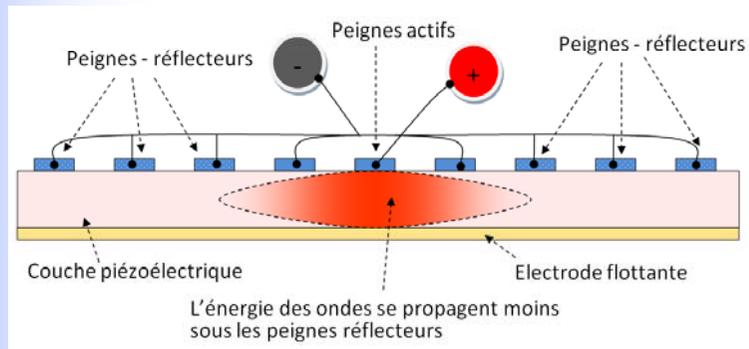
Je dédie cette présentation à ma maman, **Tènèfing Traoré** et à mon papa, **N'Golopé Koné**

Réflecteurs vs. gravure de la couche piézo

- Changement de lignes de champs en fonction de la fréquence
→ Difficulté pour fixer les conditions aux limites

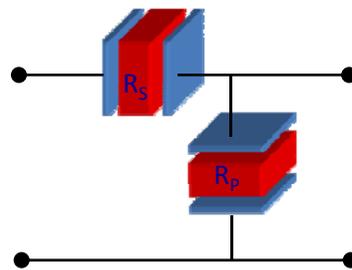
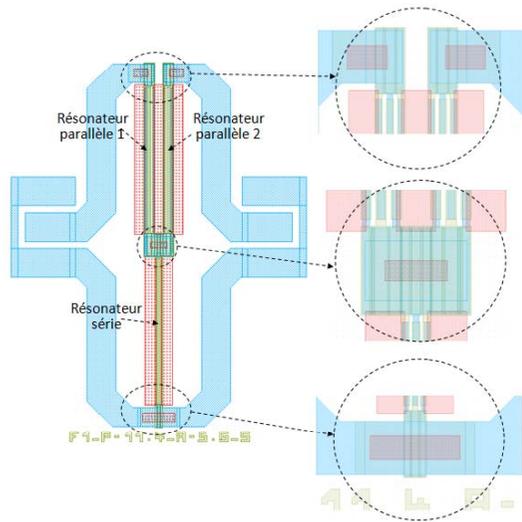


- La solution des réflecteurs est plus flexible

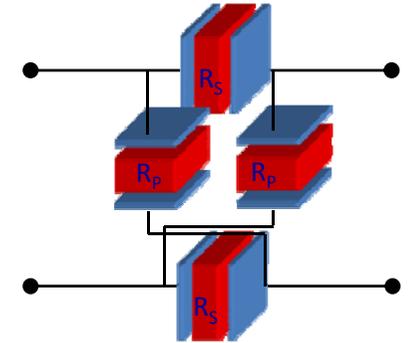
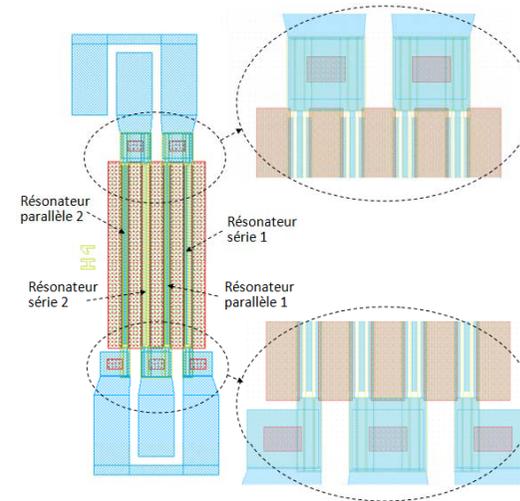


Filtres électriques et acoustiques à améliorer

- Filtre en échelle (Ladder)



- Filtre en treillis (Lattice)



- Filtres acoustique réalisés sur le masque (plaque)

