

Électroniques dédiées à l'asservissement d'oscillateurs et à la mesure physique à l'aide de capteurs à ondes élastiques.

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Franche-Comté
spécialité Sciences pour l'Ingénieur

soutenue par Nicolas CHRÉTIEN

Directeur de thèse : J.-M. FRIEDT

Co-directeur de thèse : S. BALLANDRAS



le 27 juin 2014

Électroniques dédiées à l'asservissement d'oscillateurs et à la mesure physique à l'aide de capteurs à ondes élastiques.

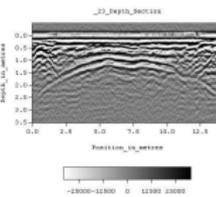
- 1 Système de mesure RADAR
- 2 Bruit de phase et résolution de mesure
- 3 Oscillateur à HBAR
- 4 Électroniques d'interrogation
- 5 Conclusion



navigation maritime



©Ditch Witch/Flickr



géologie - archéologie
 génie civil - enquête policière



militaire
aéronautique

contrôle routier
 système de sécurité

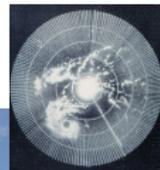
météorologie



©Dave Pearson/Flickr



©Fabio Pozzebom/ABR



RADAR : RADio Detection And Ranging

Introduction

Notion du
bruit de
phase
Besoin
d'une source
stable
Cible
coopérative

Principe de réflexion des
ondes électromagnétiques
générées par un RADAR

source : US National Weather Service

Éléments du RADAR

- générateur de signaux électriques
- antenne(s)
- étage de réception

Grandeurs mesurables

- distance d'une cible par rapport au RADAR : temps de vol
- vitesse relative de la cible : fréquence
- détection d'une position par l'utilisation d'antennes directives

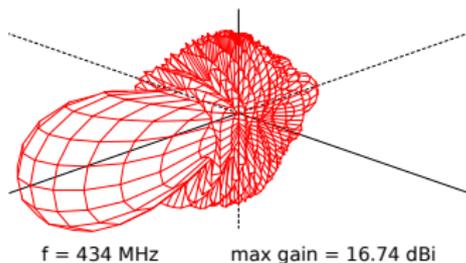


Diagramme de rayonnement d'une antenne directive Yagi.

longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

gain de
l'antenne

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2}$$

équation
de Friis

$$P_r = \frac{P_e G^2 \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

surface
équivalente
RADAR

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_f}{P_r}$$

 P_e

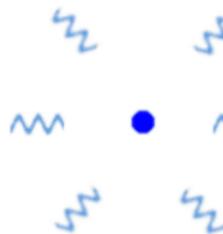
→

$$P_r = \frac{P_e G^2 \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

$$P_f = \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

←

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_f}{P_r}$$



Étage de réception :

facteur de bruit

$$F = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$$

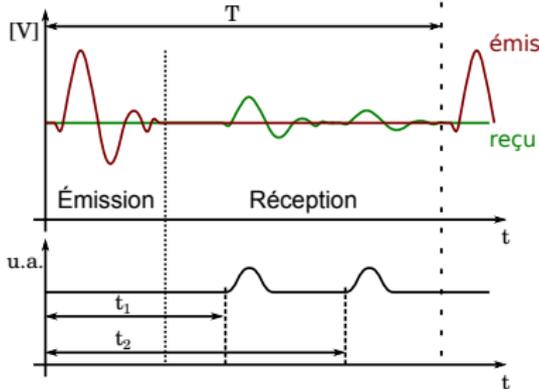
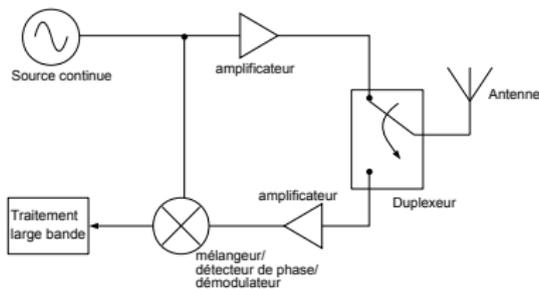
sensibilité de détection

$$S_{min} = k_B T_0 B F \left(\frac{S}{N}\right)_{min}$$

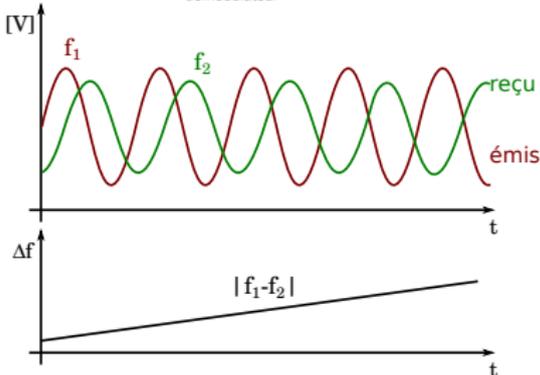
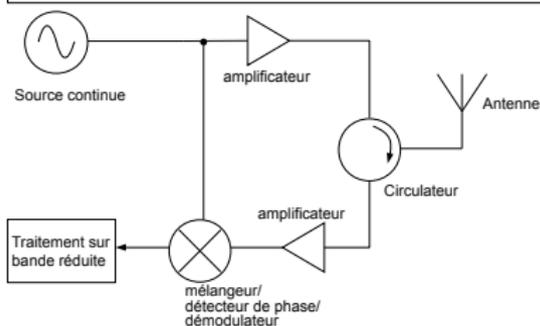
distance
maximale
d'interrogation

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot S_{min}}}$$

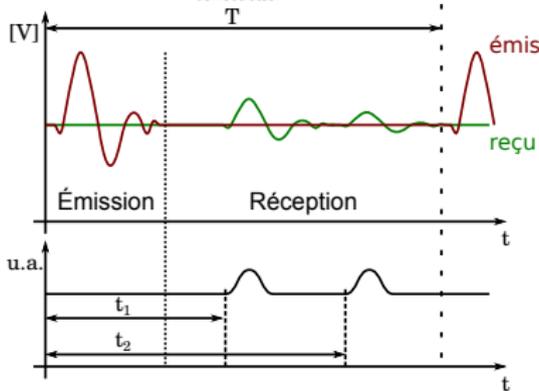
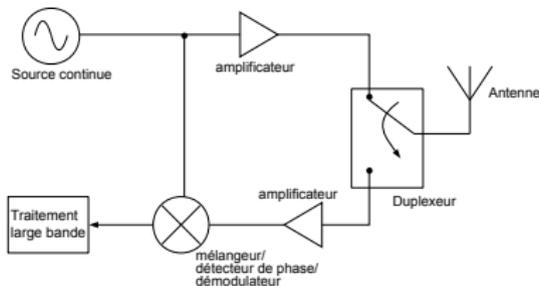
RADAR impulsionnel



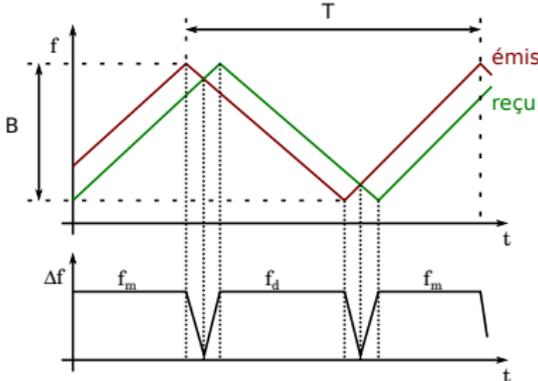
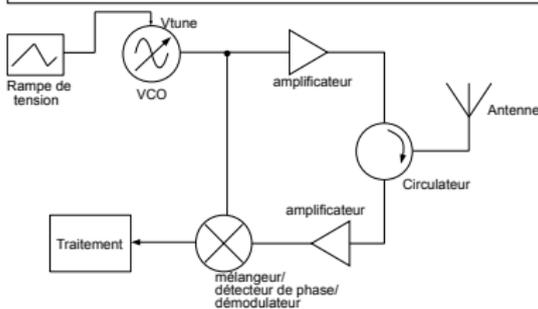
RADAR à ondes continues (CW)



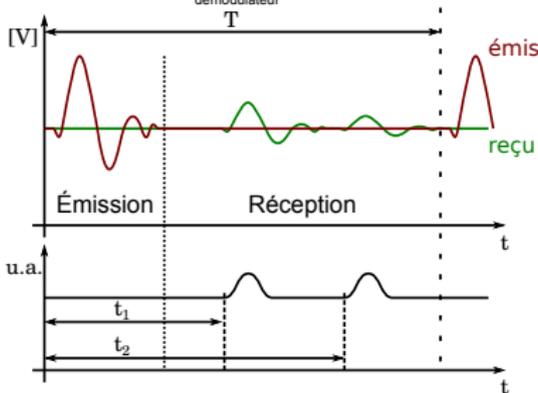
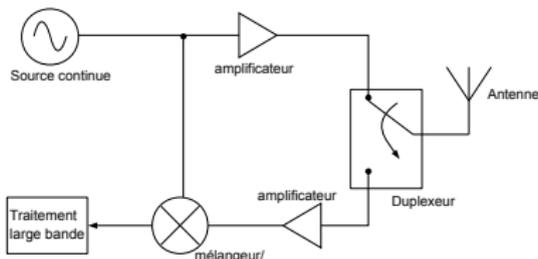
RADAR impulsionnel



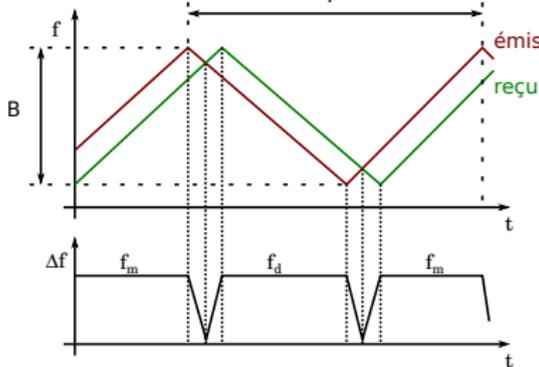
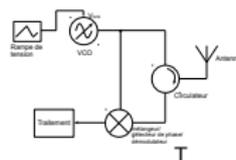
RADAR à modulation de fréquence (FMCW)



RADAR impulsionnel

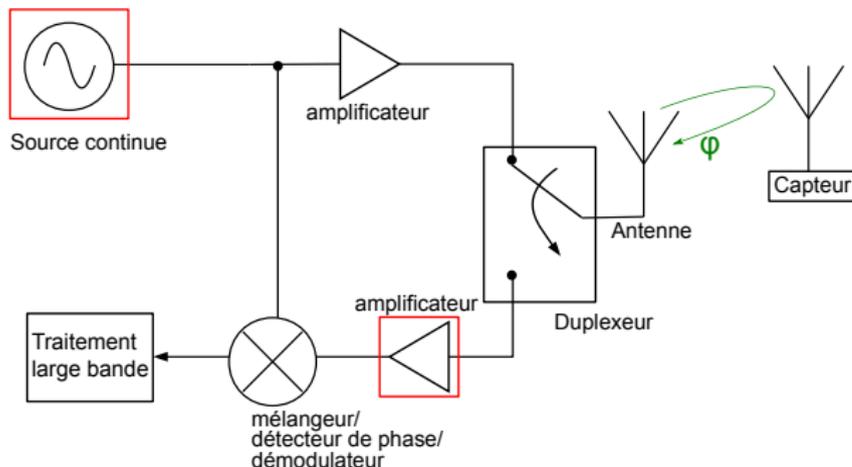


RADAR à modulation de fréquence (FMCW)



$$d = \frac{c \cdot T}{4 \cdot B} \cdot \frac{f_d + f_m}{2}$$

$$v = \frac{c}{2 \cdot f_c} \cdot \frac{f_d - f_m}{2}$$

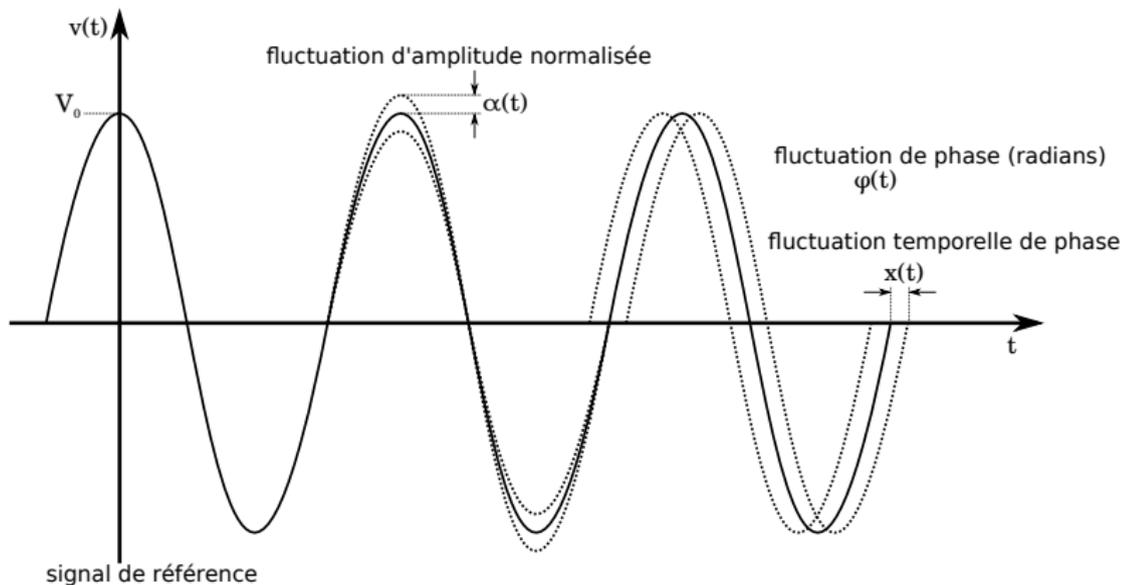


- Bruit additif d'un amplificateur :
$$S_{\varphi LNA} = \frac{Fk_B T_0}{P_0}$$

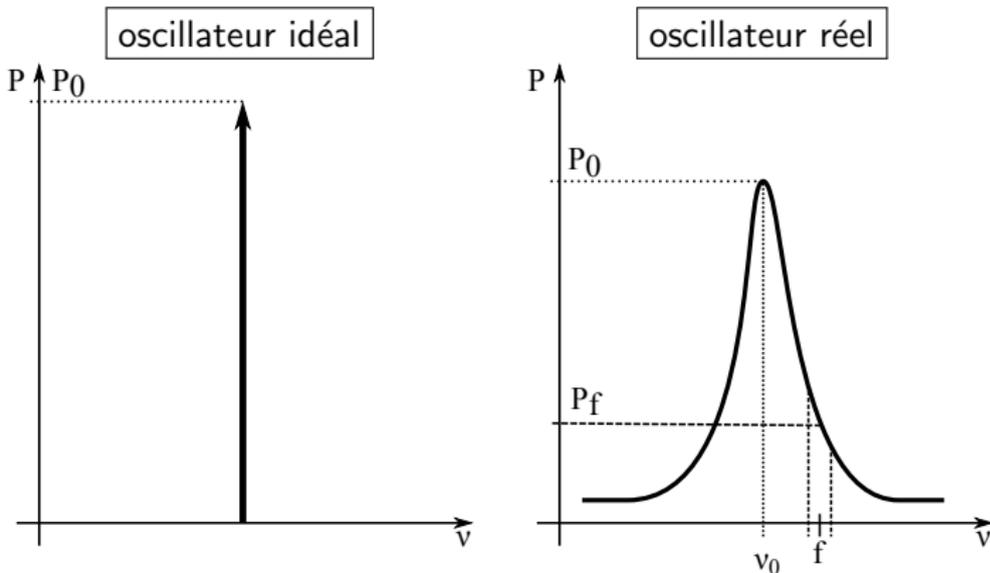
avec dans notre cas : $P_0 = P_f = \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$
- Instabilités de la source de fréquence

Les instabilités de la porteuse peuvent être décrites comme des fluctuations d'amplitude $\alpha(t)$ et de phase $\varphi(t)$:

$$s(t) = V_0(1 + \alpha(t)) \cdot \sin(2\pi\nu_0 t + \varphi(t))$$



Le bruit de l'oscillateur engendre un étalement spectral :

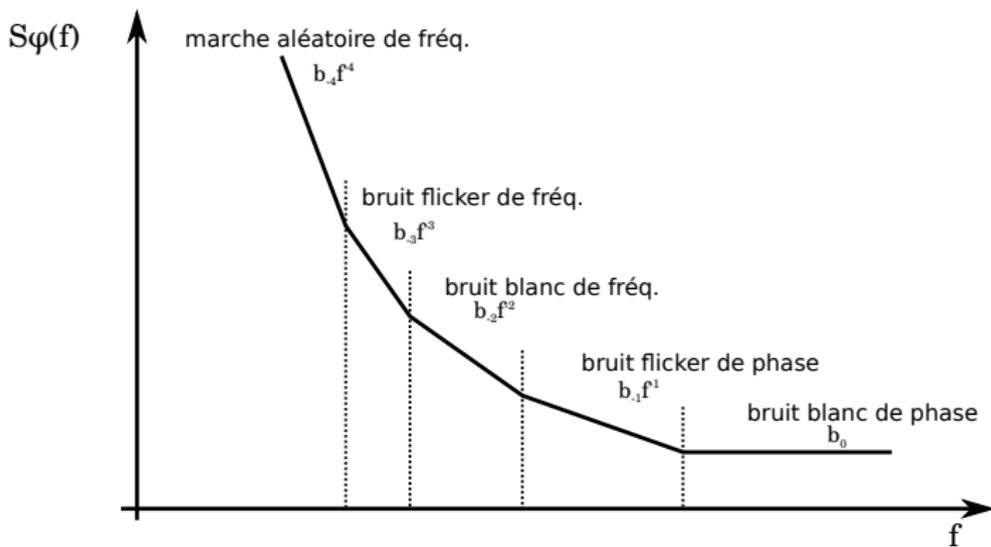


Celui-ci peut être représenté par sa densité spectrale de bruit de phase :

$$S_{\varphi}(f) = \frac{\varphi_{RMS}^2}{B} \text{ en dBrad}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$$

ou en bande latérale unique : $L(f) = \frac{1}{2} S_{\varphi}(f)$ en dBc.Hz⁻¹

Le bruit de l'oscillateur engendre un étalement spectral :

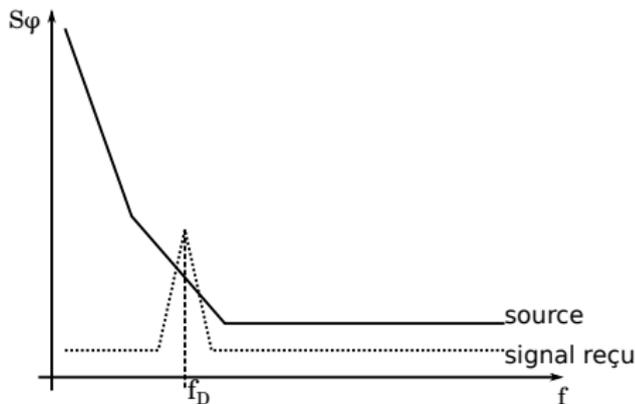
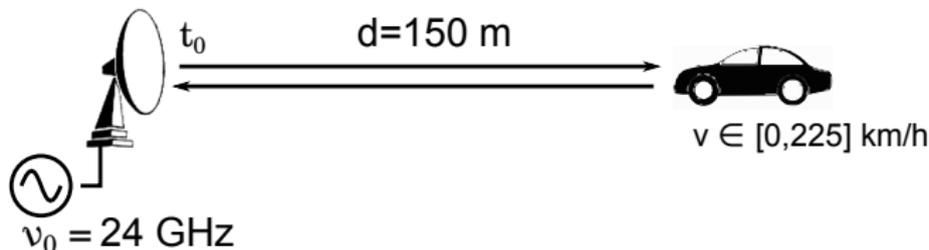


Celui-ci peut être représenté par sa densité spectrale de bruit de phase :

$$S_\varphi(f) = \frac{\varphi_{RMS}^2}{B} \text{ en } \text{dBrad}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$$

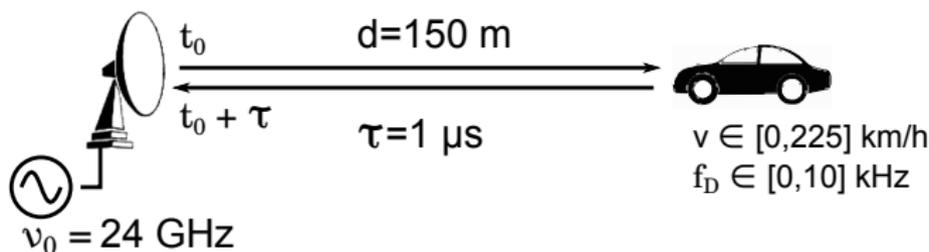
ou en bande latérale unique : $L(f) = \frac{1}{2} S_\varphi(f)$ en $\text{dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$

Application : RADAR routier

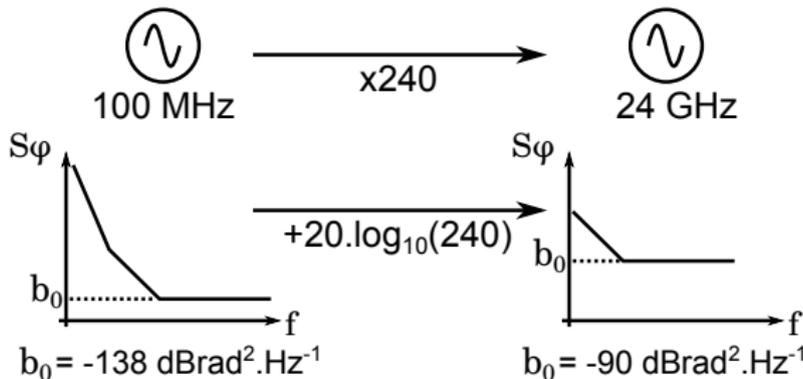


On considère le cas idéal où la puissance du signal reçu est suffisante pour être détectée.

Application : RADAR routier

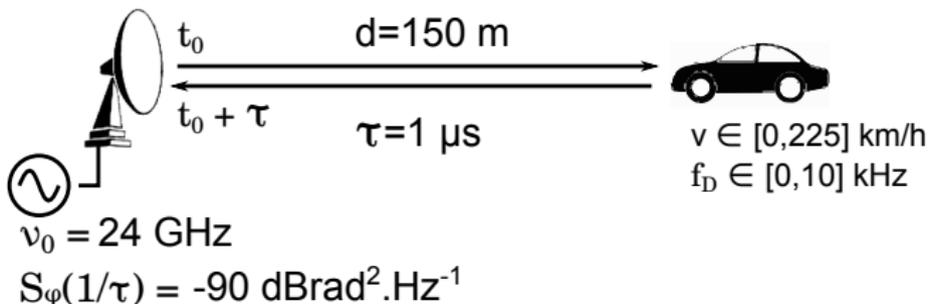


$$S_\varphi(1/\tau) = -90\text{ dBrad}^2.\text{Hz}^{-1}$$



La multiplication par 240 d'une source à 100 MHz engendre une augmentation du bruit de phase de $48\text{ dBrad}^2.\text{Hz}^{-1}$.

Application : RADAR routier



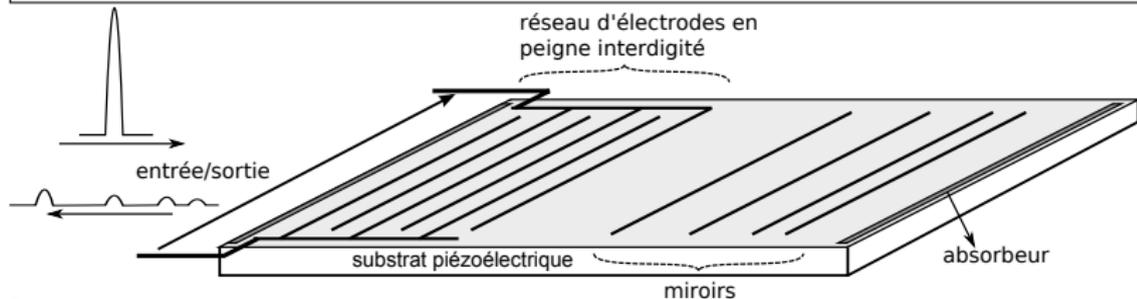
$$r_v(\tau) = \sqrt{\frac{3f_H b_0 \tau^{-2}}{(2\pi)^2 \nu_0^2}} \times \frac{c\sqrt{2}}{2}$$

b_0	r_v
$\text{dBrad}^2.\text{Hz}^{-1}$	km.h^{-1}
-90	28
-138	0,1

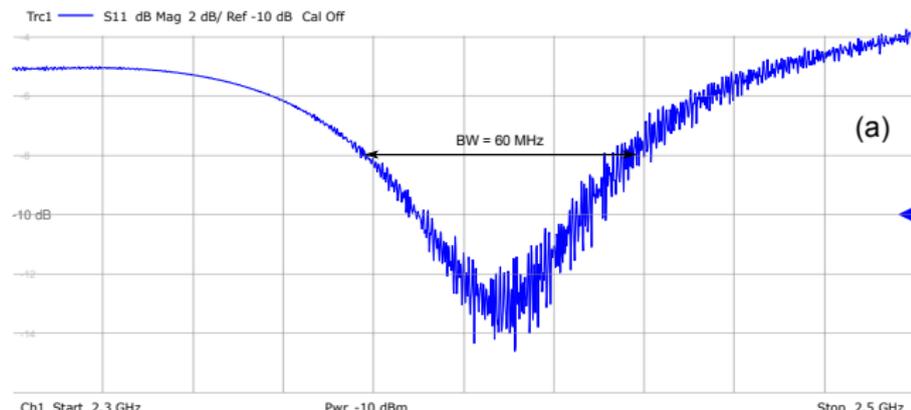
Cible coopérative

- échos reproductibles
- interrogation filaire ou sans fil
- dispositif à volume réduit
- mesure du temps de vol pour caractériser une grandeur physique
- fiabilité de la réponse

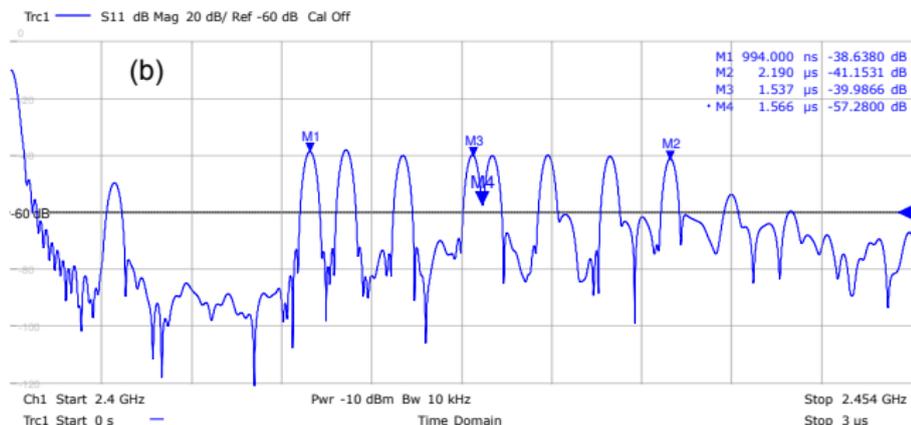
Ligne à retard à onde élastique de surface (SAW^a)



^a Surface Acoustic Wave



réponse spectrale

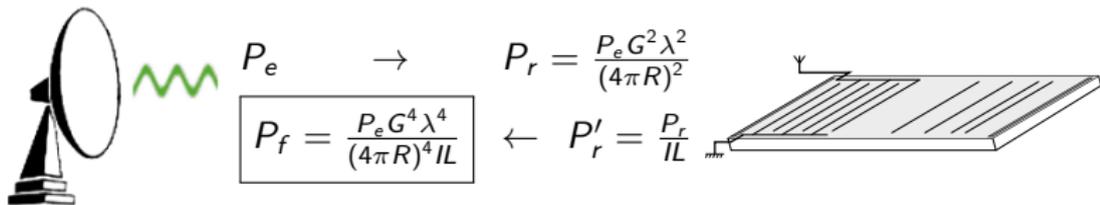


réponse temporelle

Introduction des pertes d'insertion
dans l'équation du RADAR :
Double application de l'équation de
Friis.

équation
de Friis

$$P_r = \frac{P_e G^2 \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$



distance maximale
d'interrogation

$$R_{max} = \frac{G \cdot \lambda}{4\pi} \sqrt[4]{\frac{P_e}{k_B T_o B F \cdot (S/N)_{min} \cdot IL}}$$

A.N. : $f = 2,45$ GHz, $IL = 40$ dB,
 $F = 1$ dB, $G = 6$ dB, $T_o = 298$ K,
 $B = 30$ MHz, $P_e = 10$ dBm

$(S/N)_{min}$ [dB]	1	3	20
R_{max} [m]	2,0	1,6	0,6

La cible coopérative est conçue pour fonctionner en tant que capteur de température.

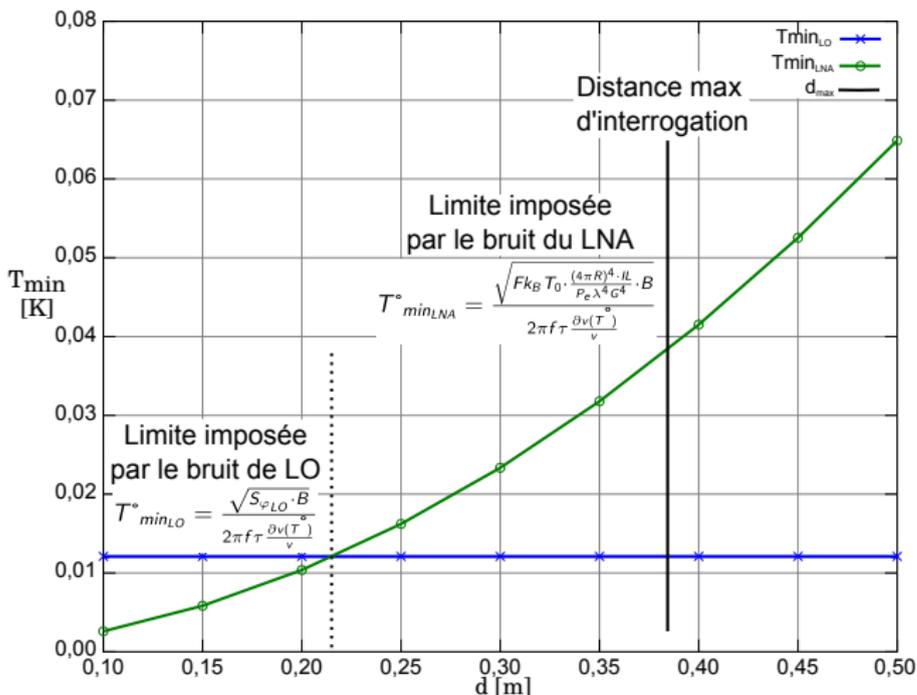
$$s_{\varphi} = 2\pi \times f \times \tau \times \frac{\partial v(T^{\circ})}{v}$$

La résolution de mesure de température est limitée par les fluctuations de phase indépendantes de la température.

$$T^{\circ}_{min} = \frac{\sigma_{\varphi}}{s_{\varphi}} = \frac{\sigma_{\varphi}}{2\pi \times f \times \tau \times \frac{\partial v(T^{\circ})}{v}}$$

Les fluctuations de phase peuvent être estimées de manière théorique en fonction des caractéristiques des composants de la chaîne de mesure.

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{2 \times L(f) \times B}$$



Paramètres de simulation :

$f = 2,45$ GHz

$B = 50$ MHz

$T^* = 300$ K

$G = 1$ dB

$F = 1$ dB

$IL = 40$ dB

$P_e = 10$ dBm

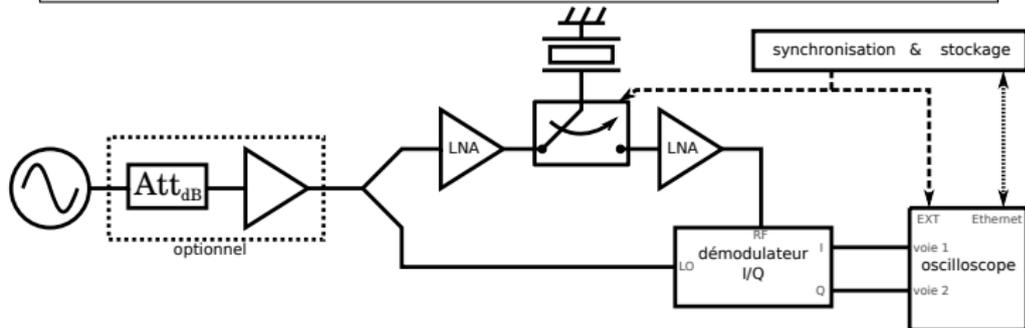
$\tau_{\text{capteur}} = 2 \mu\text{s}$

$\frac{\partial v(T^*)}{v} = 60$ ppm/K

$(S/N)_{min} = 3$ dB

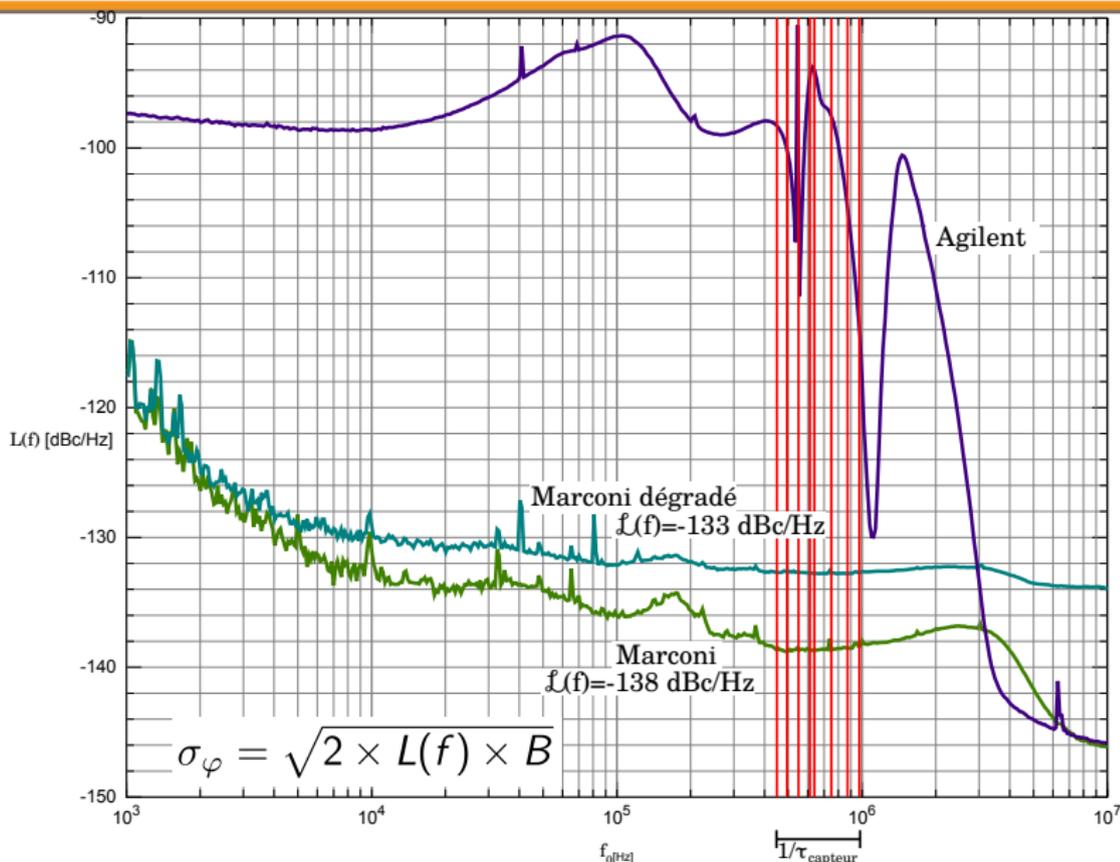
$S_{\varphi_{LO}} = -110$ dBrad²/Hz

Banc de mesure de l'influence du bruit de phase de la source de fréquence sur la mesure d'une ligne à retard à ondes élastiques



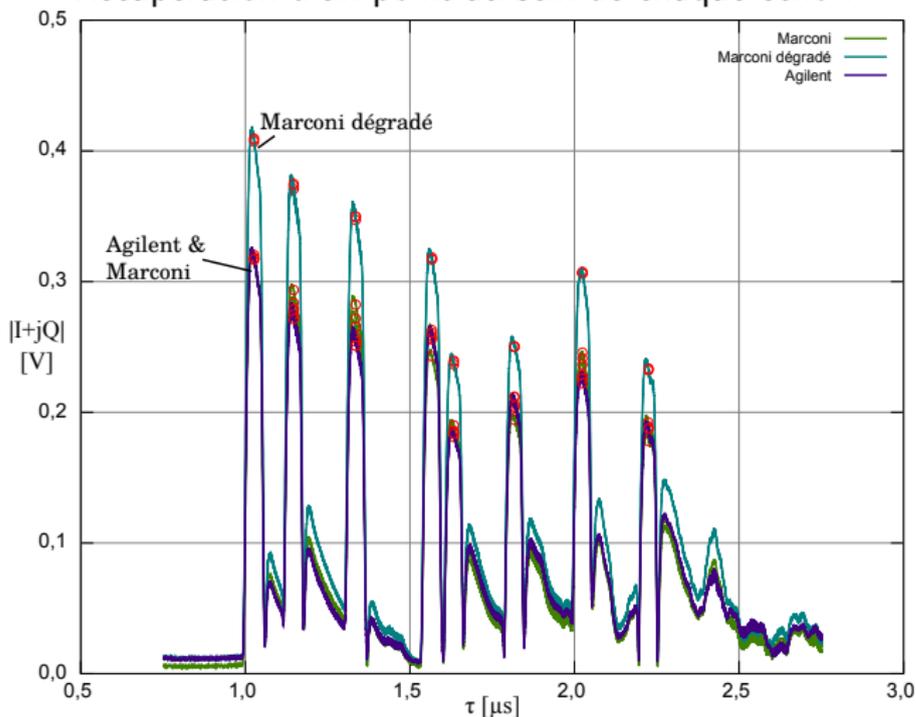
Conditions expérimentales

- Variations de température restreintes (bouteille Dewar) sur les 900 mesures de la ligne à retard effectuées
- Bruits additifs des amplificateurs et du démodulateur inférieurs au bruit de la source de fréquence
- Séries de mesures effectuées à trois niveaux différents de bruit de phase de la source

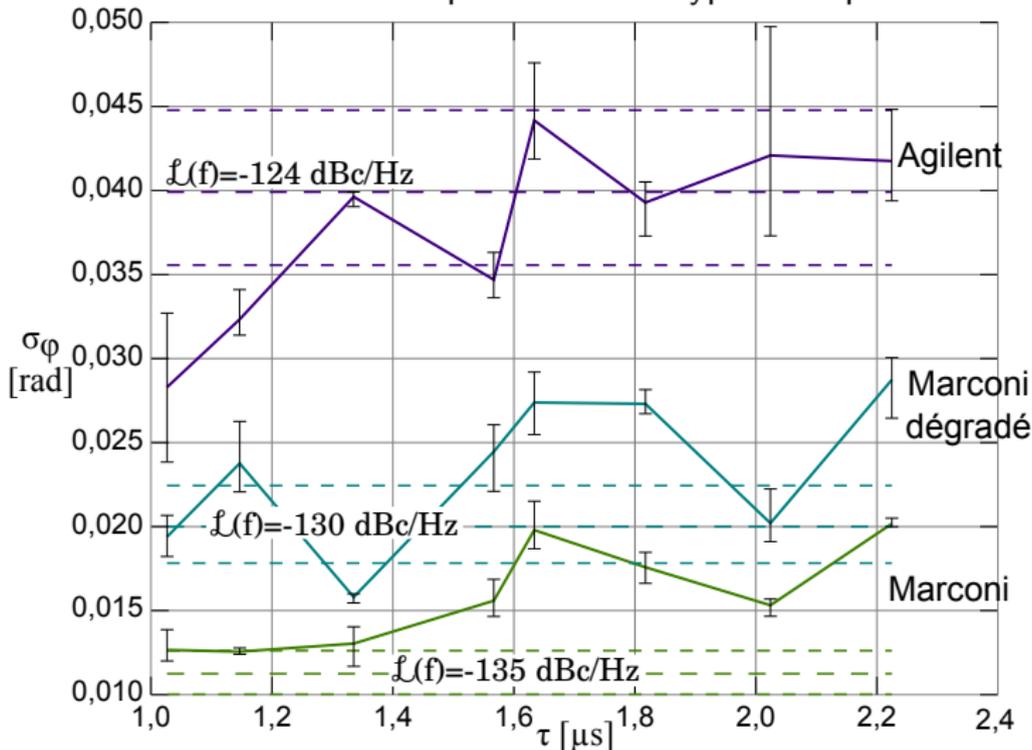


$f = 2,427$ GHz : Agilent E5071B & Marconi 2042 mesurés au banc Agilent E5052A

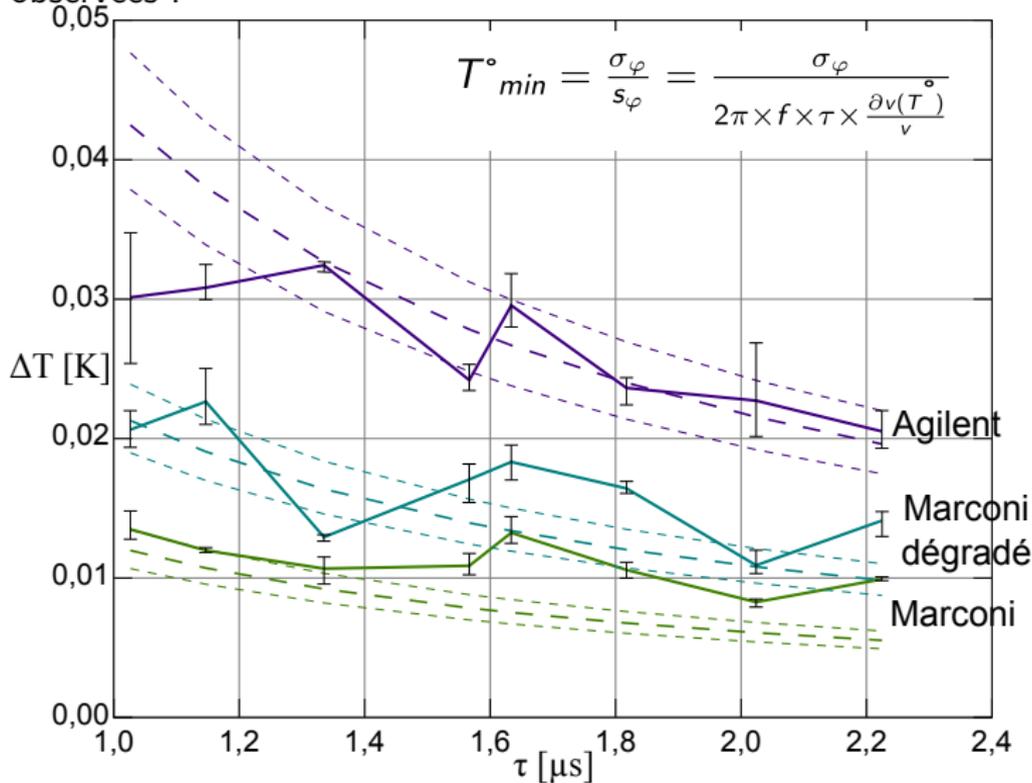
Récupération d'un point au sein de chaque écho :



Écart-type moyen des phases au centre des échos pour les trois sources différentes et valeurs théoriques de l'écart-type de la phase :



Fluctuations de température correspondant aux fluctuations de phase observées :



N.
CHRÉTIENSystème
de mesure
RADARBruit de
phase et
résolution
de mesureÉtude
préalable
Banc de
mesure
Résultats et
analyses
ConclusionOscillateur
à HBARÉlectroniques
d'interro-
gation

Conclusion

- les résultats expérimentaux confirment l'analyse théorique ¹
- le bruit de l'oscillateur local dégrade la résolution de mesure
- l'influence du bruit de phase de la source RF sur la résolution de mesure dépend des conditions expérimentales
- l'augmentation de P_e permet de réduire les limitations imposées par le bruit additif des amplificateurs...
- ...mais pas celui du bruit de phase de l'oscillateur !

⇒ nécessité de disposer d'oscillateurs à faible bruit de phase

¹ N. Chrétien, J.-M. Friedt et G. Martin : *Local oscillator phase noise limitation on the resolution of acoustic delay line wireless passive sensor measurement*. Review of Scientific Instruments, 85(6) :065001, 2014

ORAGE

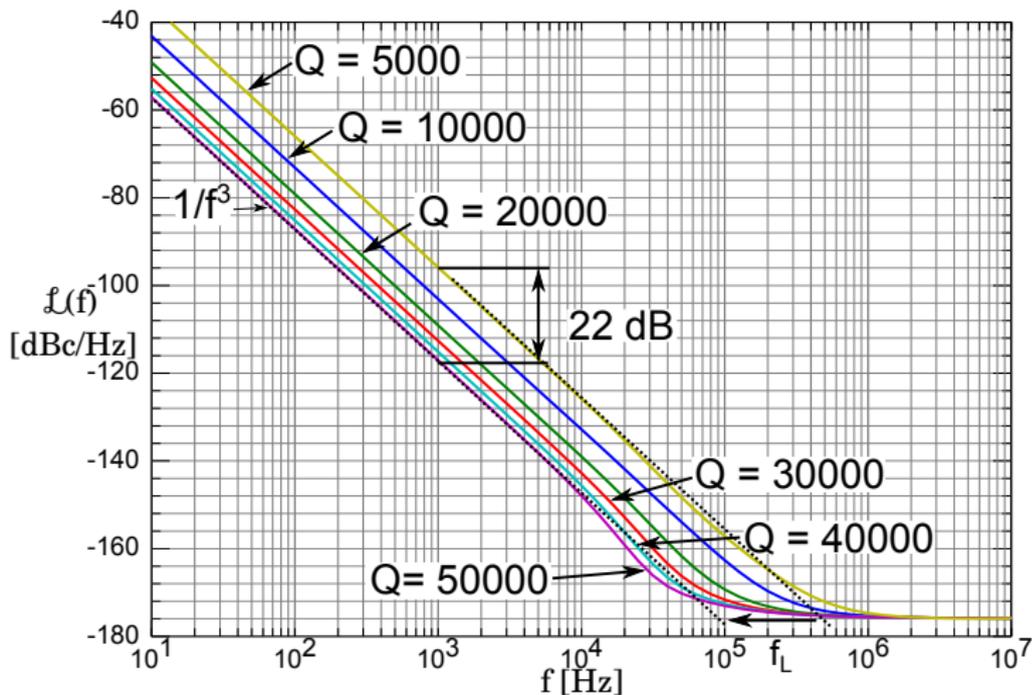
- « Oscillateurs à Résonateurs Acoustiques à ondes de volume harmoniques sur substrats composites monocristallins pour la Génération de signaux Electriques radiofréquences de hautes stabilité et pureté spectrale en bandes directes »
- projet piloté par la société SENSEOR associant FEMTO-ST et le CEA-LETI soutenu par un financement RAPID de la DGA

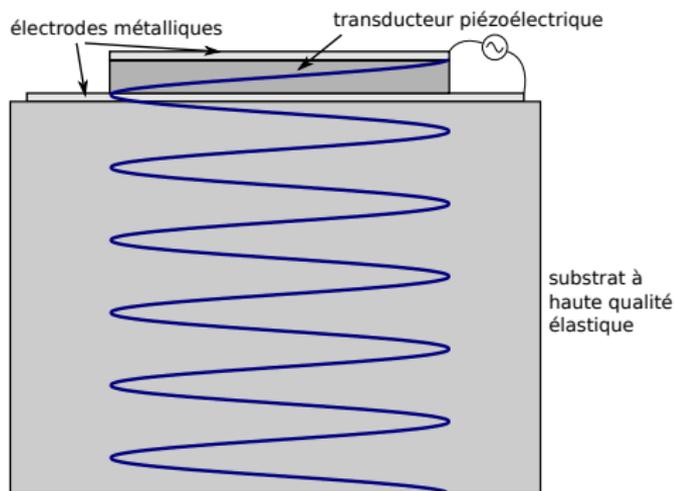
Enjeux

- réalisation de résonateurs « HBAR »^a à fort coefficient de qualité (produit $Qf > 2 \cdot 10^{13}$, pour $f > 2$ GHz)
- oscillateurs stabilisés par ces résonateurs en vue d'applications embarquées (faible encombrement et instrumentation externe)

a. High-overtone Bulk Acoustic Resonator ou résonateurs à onde de volume à modes harmoniques élevés

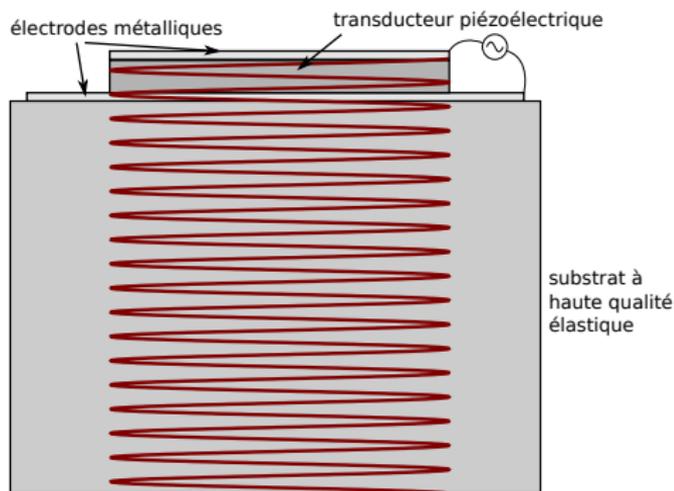
Effet du facteur de qualité sur le bruit de phase d'un oscillateur





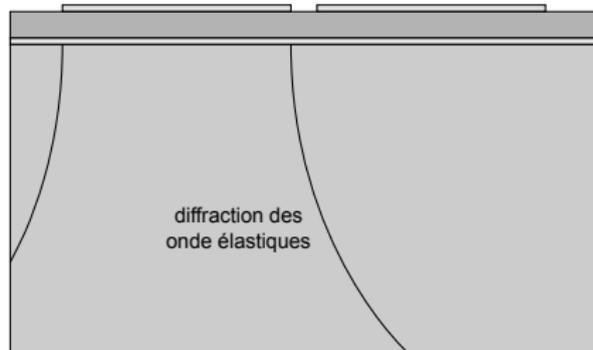
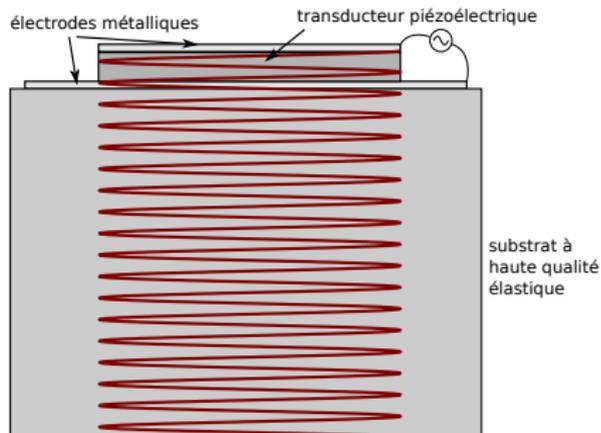
mode fondamental de la couche piézoélectrique

- confinement des ondes élastiques dans le volume du substrat pour augmenter le facteur de qualité
- excitation des ondes par une couche piézoélectrique entre deux électrodes métalliques
- possibilité de configuration quadripolaire à l'aide de deux électrodes en surfaces et une unique électrode au potentiel flottant

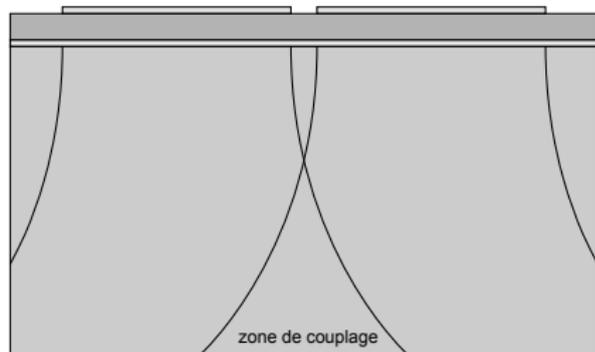
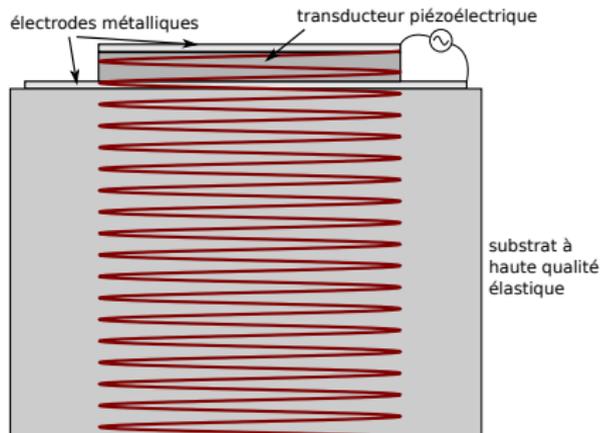


troisième harmonique de la couche piézoélectrique

- confinement des ondes élastiques dans le volume du substrat pour augmenter le facteur de qualité
- excitation des ondes par une couche piézoélectrique entre deux électrodes métalliques
- possibilité de configuration quadripolaire à l'aide de deux électrodes en surfaces et une unique électrode au potentiel flottant

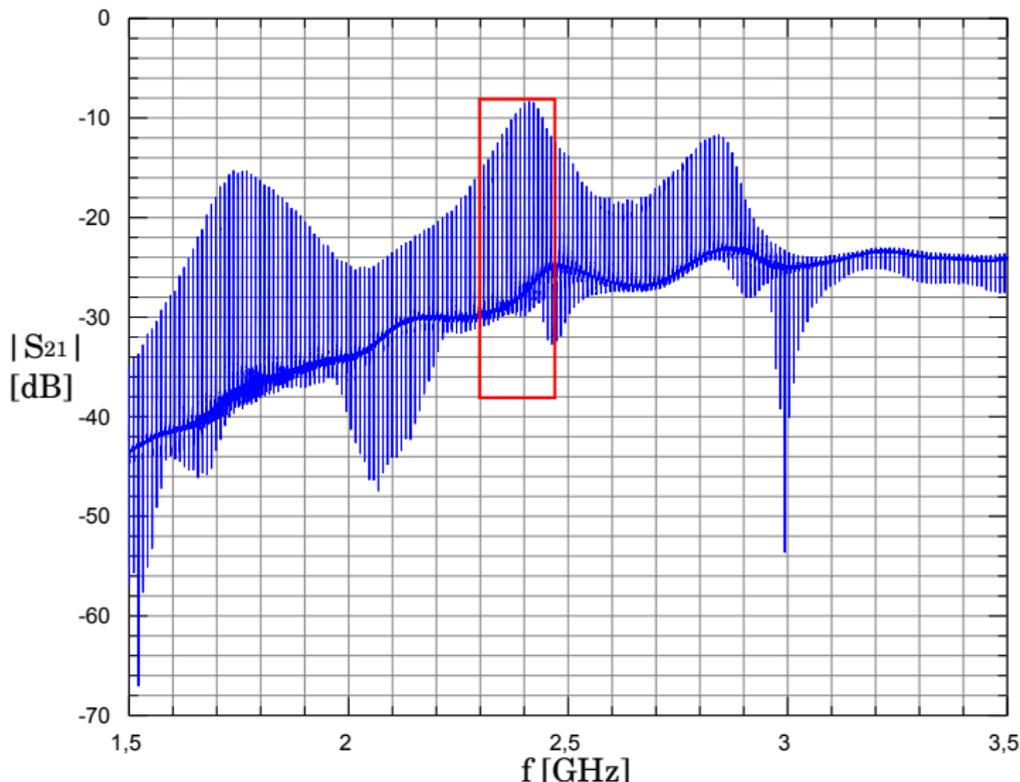


- confinement des ondes élastiques dans le volume du substrat pour augmenter le facteur de qualité
- excitation des ondes par une couche piézoélectrique entre deux électrodes métalliques
- possibilité de configuration quadripolaire à l'aide de deux électrodes en surfaces et une unique électrode au potentiel flottant

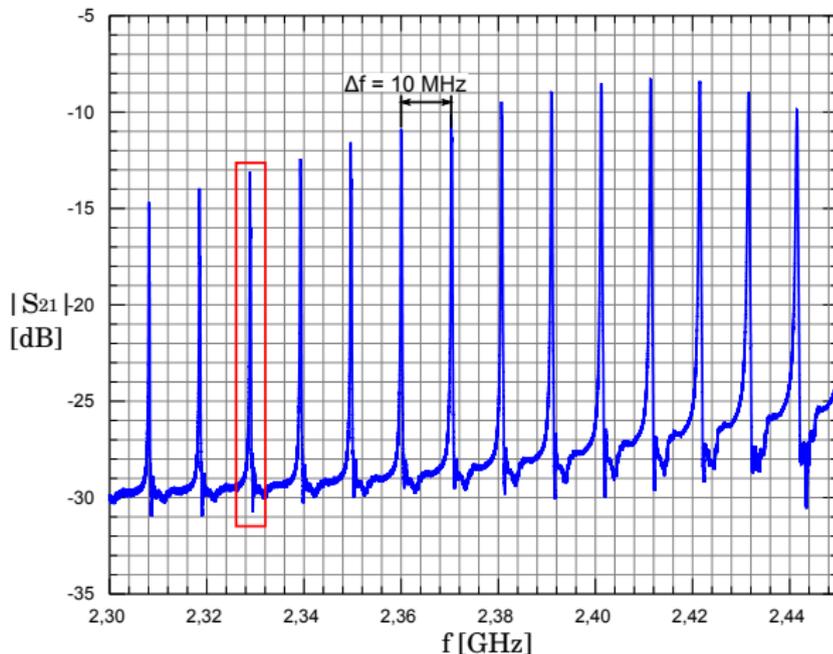


- confinement des ondes élastiques dans le volume du substrat pour augmenter le facteur de qualité
- excitation des ondes par une couche piézoélectrique entre deux électrodes métalliques
- possibilité de configuration quadripolaire à l'aide de deux électrodes en surfaces et une unique électrode au potentiel flottant

Réponse en transmission d'un HBAR AIN sur Saphir exploitant un couplage acoustique entre électrodes :



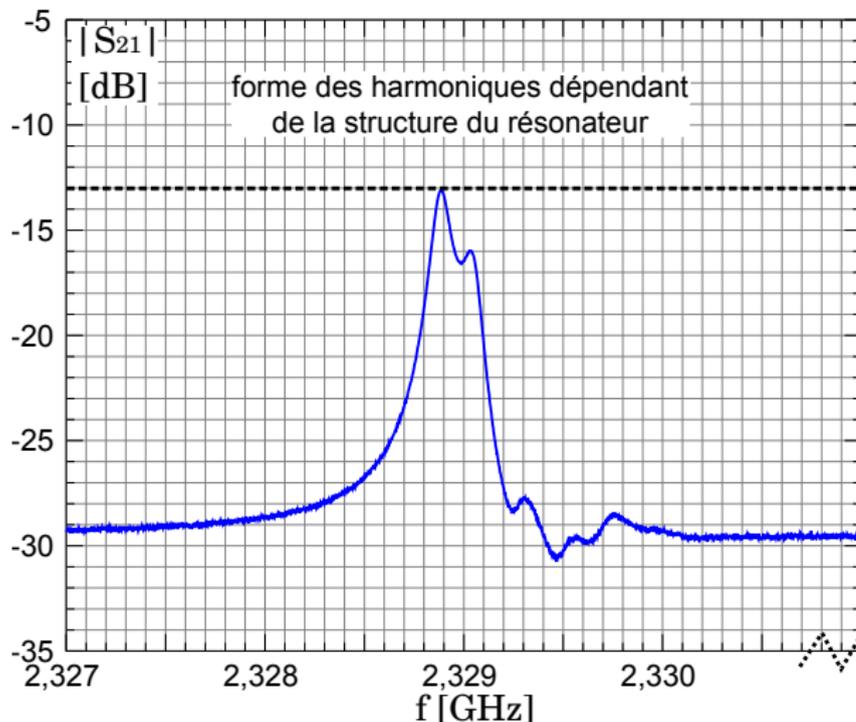
Réponse en transmission d'un HBAR AIN sur Saphir exploitant un couplage acoustique entre électrodes :



$$\Delta f = \frac{c}{2e}$$

e , épaisseur
du substrat

Réponse en transmission d'un HBAR AIN sur Saphir exploitant un couplage acoustique entre électrodes :



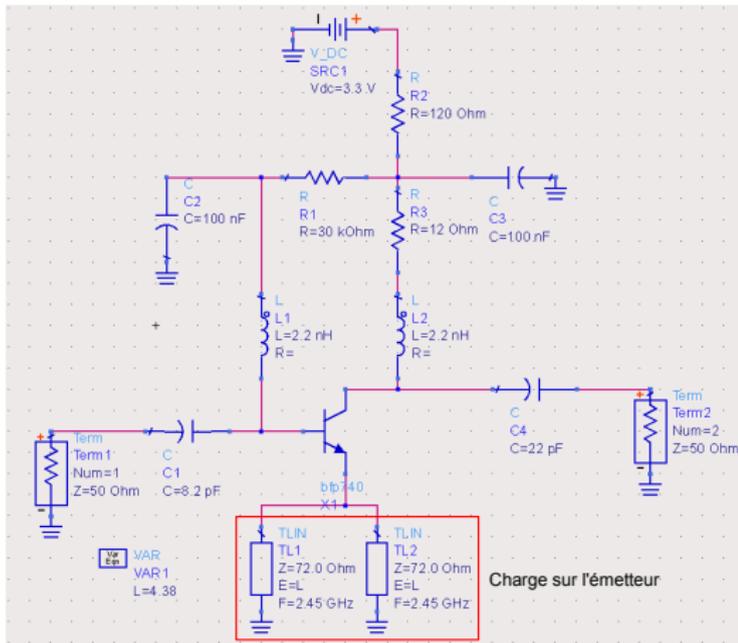
Les simulations sont effectuées sur le logiciel ADS d'Agilent :

Pour effectuer une simulation du bruit de phase d'un amplificateur, le logiciel doit disposer du modèle non-linéaire de celui-ci.

Le transistor : BFP740

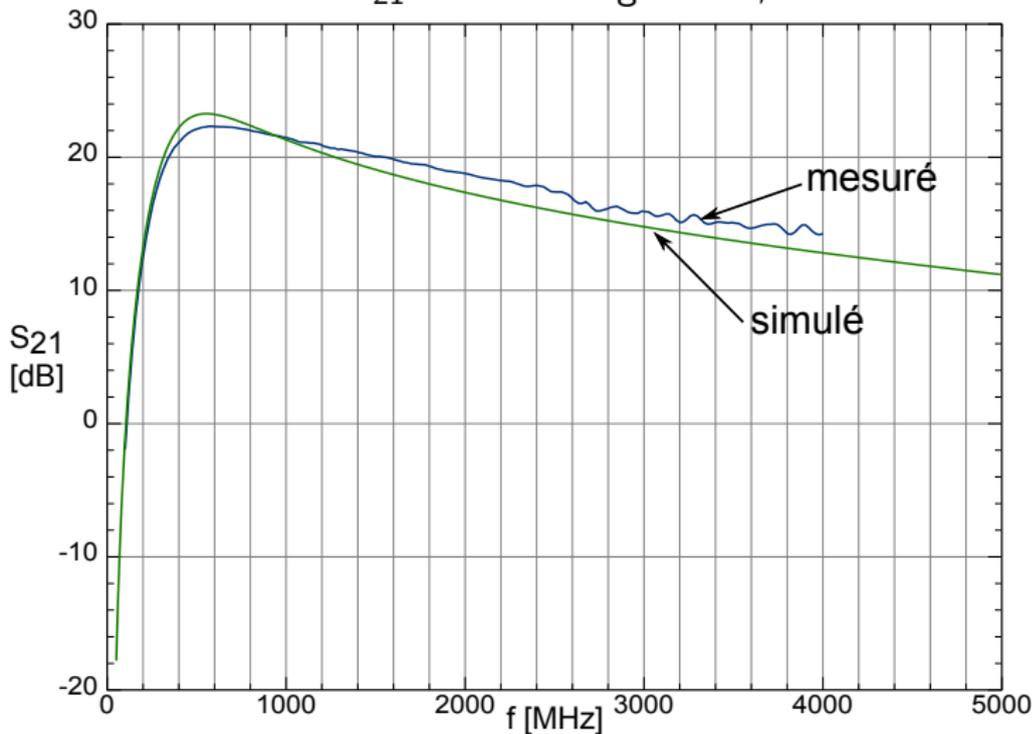
- modèle non-linéaire fourni par Infineon
- transistor bipolaire SiGe
- gain maximum stable de 27 dB à 1,8 GHz sur charge adaptée (sur circuit de test du fabricant)
- gain théorique de 24,5 dB à 1,8 GHz sur charge 50 Ω
- facteur de bruit de 0,5 dB à 1,8 GHz

Découplage de l'émetteur par des lignes micro-ruban : amélioration de la stabilité du montage en dépit du gain

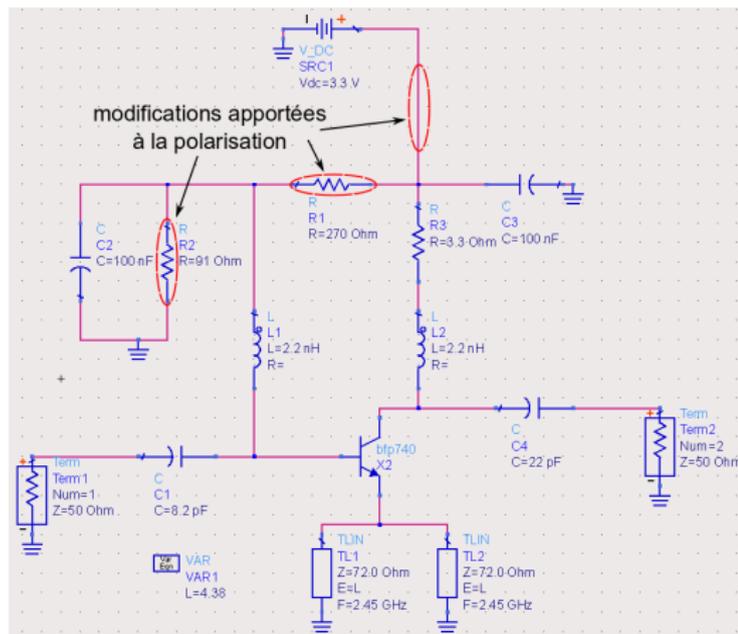


N.
CHRÉTIENSystème
de mesure
RADARBruit de
phase et
résolution
de mesureOscillateur
à HBARIntroduction
de l'amplificateur
Oscillateur
en
transmission
Résultats
expérimentauxÉlectroniques
d'interrogation

Conclusion

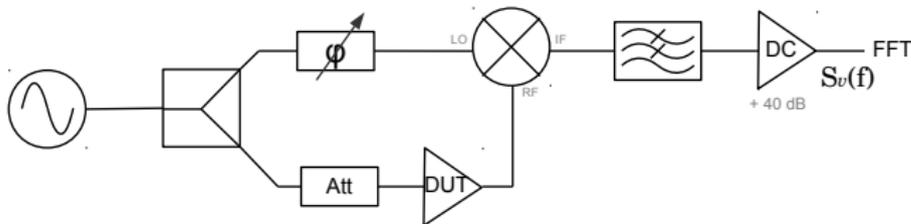
Paramètres S_{21} : 18 dB de gain à 2,45 GHz

Des travaux de recherche¹ ont montré l'importance de l'impédance vue par la jonction base-émetteur du transistor dans la conception de dispositifs à faible bruit de phase.



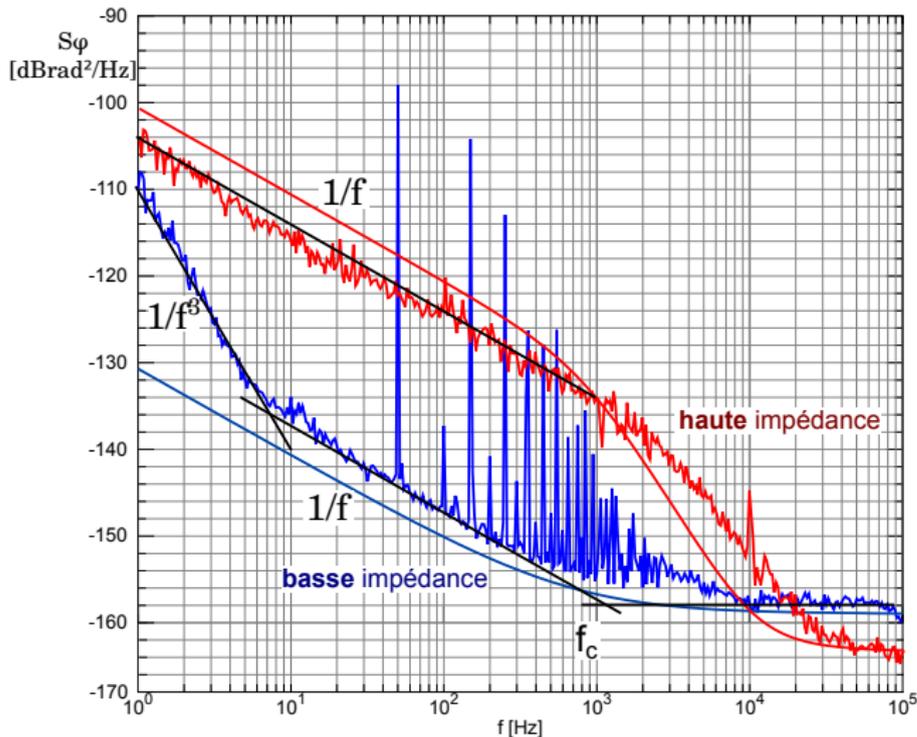
¹ O. Llopis, et al. : *Analytic investigation of frequency sensitivity in microwave oscillators : application to the computation of phase noise in a dielectric resonator oscillator*. Annales des télécommunications, 1996.

La mesure du bruit de phase en boucle ouverte est effectuée à l'aide d'un banc de mesure simple :



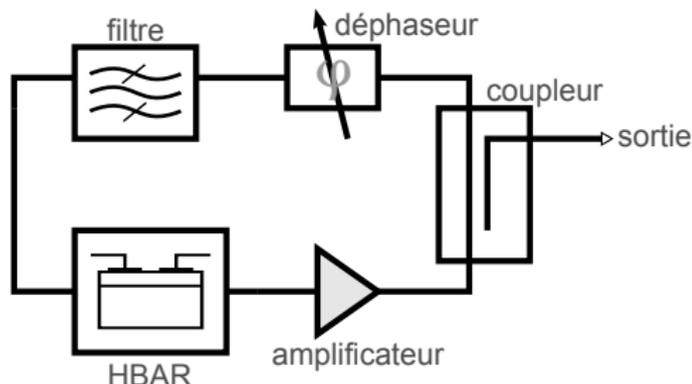
- Le mélangeur est utilisé comme détecteur de phase : $S_{\varphi}(f) = \frac{S_V(f)}{k_{\varphi}^2}$
- La sensibilité k_{φ} est estimée à l'aide d'une méthode de mesure en quasi-statique avec détection de l'amplitude crête en sortie.

Bruits de phase simulés et mesurés des deux types d'amplificateurs

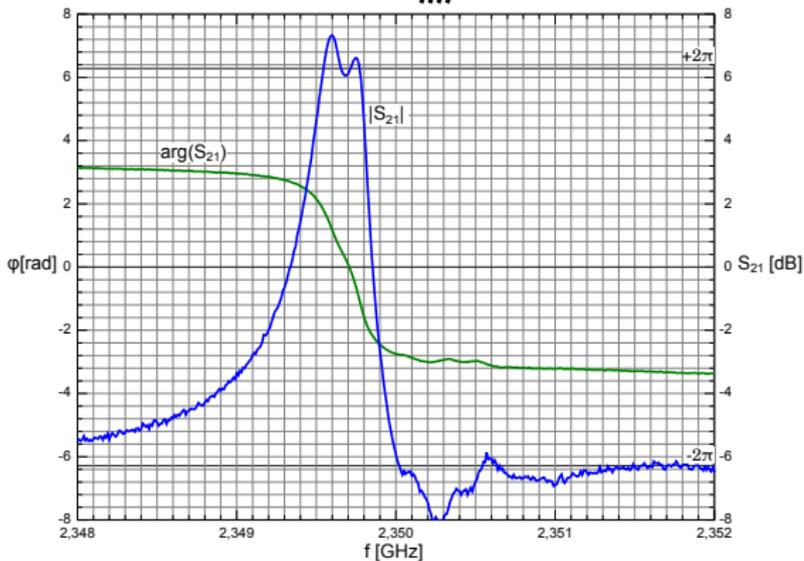
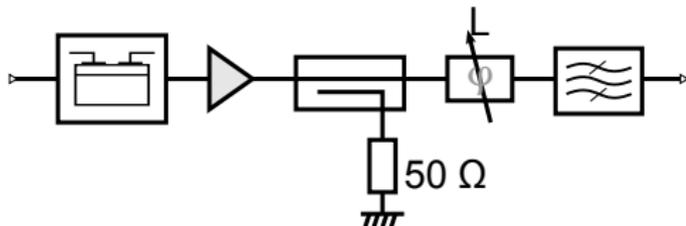


Oscillateur en transmission

- nécessité de disposer un filtre passe-bande dans la boucle pour sélectionner la zone de travail du résonateur HBAR
- un coupleur permet l'isolation de la boucle par rapport à la charge de sortie
- approche expérimentale (en boucle ouverte) pour la vérification des conditions de Barkhausen : $G > 1$ et $\varphi = 0$

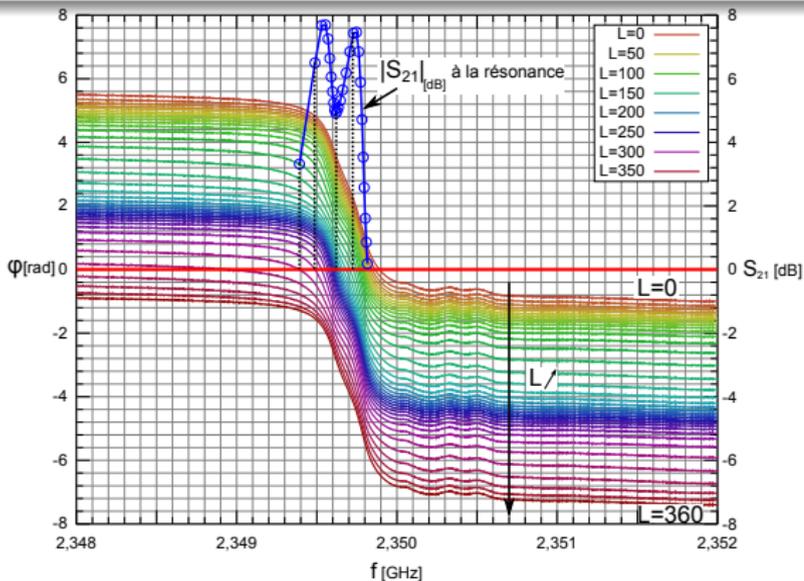


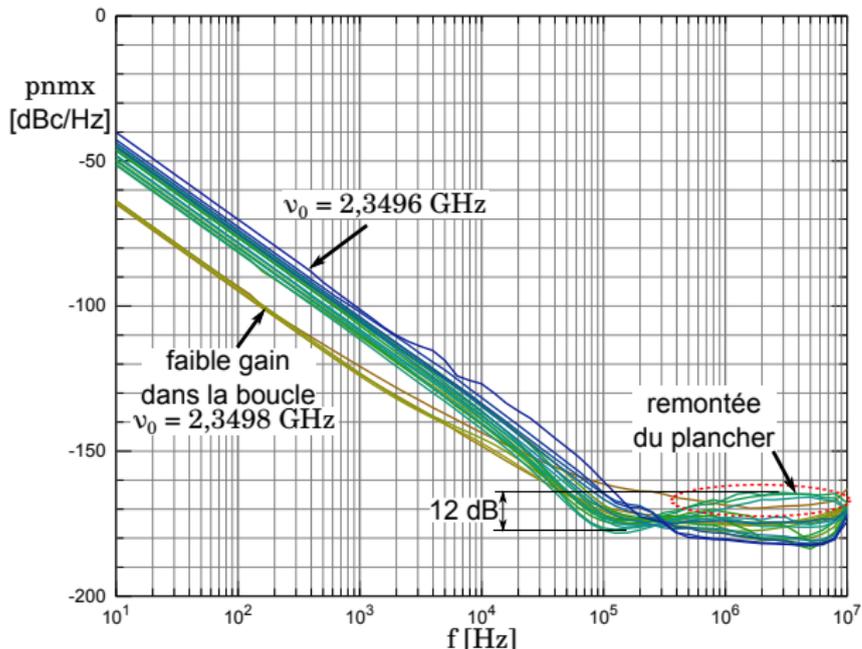
Boucle ouverte :



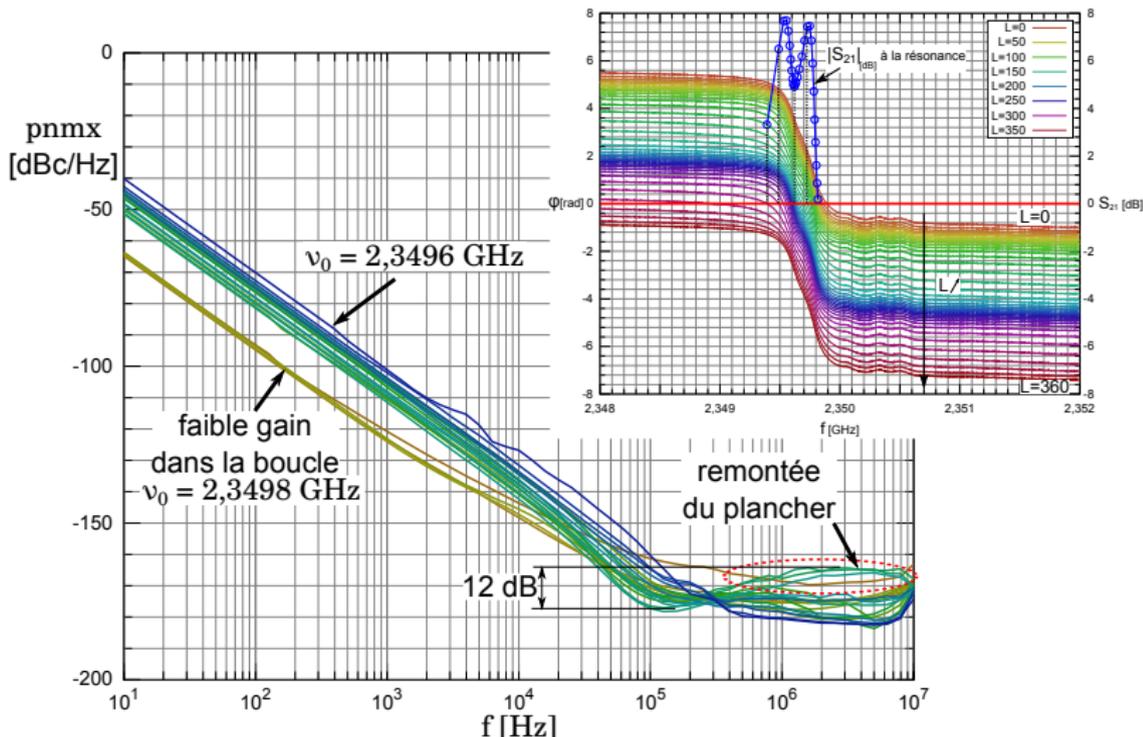
Éléments de la simulation

- modèle de l'amplificateur précédemment simulé
- fichiers de points mesurés pour le coupleur, le filtre et le résonateur
- déphaseur simulé par une ligne idéale

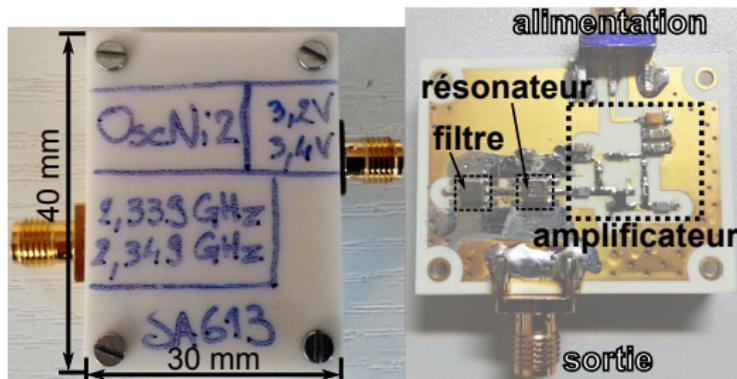




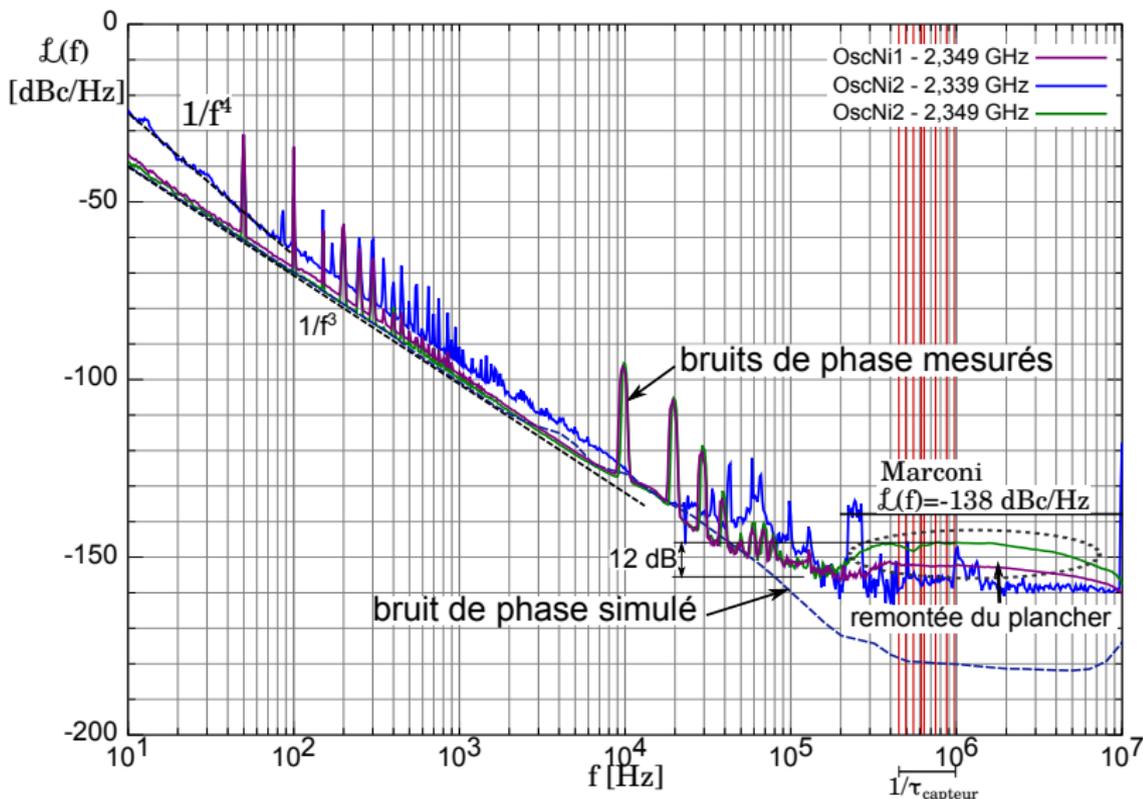
La forme du bruit de phase dépend fortement du point de fonctionnement sur une harmonique dégradée par le sur-couplage !



La forme du bruit de phase dépend fortement du point de fonctionnement sur une harmonique dégradée par le sur-couplage !



Nomenclature Oscillateur	Nomenclature Résonateur	Fréquence [GHz]	Q en charge (50 Ω)	Q × f
OscNi1	SA669	2,339	10080	$2,4 \cdot 10^{13}$
OscNi1	SA669	2,349	9750	$2,3 \cdot 10^{13}$
OscNi2	SA613	2,339	12930	$3 \cdot 10^{13}$
OscNi2	SA613	2,349	11600	$2,7 \cdot 10^{13}$



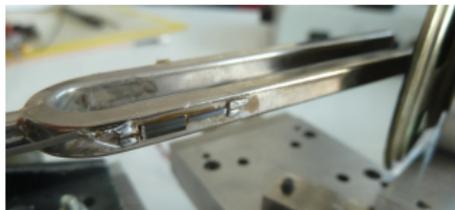
Mesure de température

- capteur commercial CTR^a
- une mesure par milliseconde \Rightarrow gradient thermique > 30 K/min
- faible ressource de traitement : démonstration d'une électronique embarquée

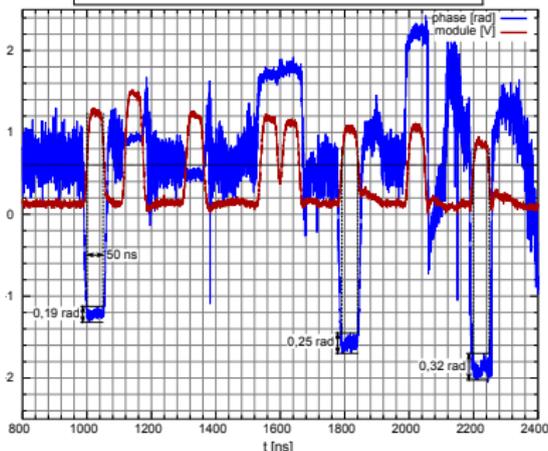
a. Carinthian Tech Research

Mesure de contrainte

- capteur en développement (réalisation freq|n|sys)
- détection des contraintes d'un diapason résonant à 440 Hz
- application à bande passante de traitement élevée

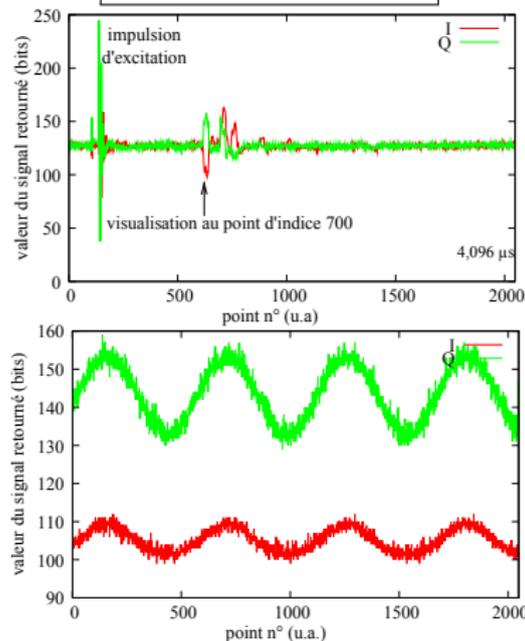


Méthode stroboscopique



- échantillonnage en temps équivalent
- temps de mesure de calibration de 72 ms
- bande passante max 35 kHz

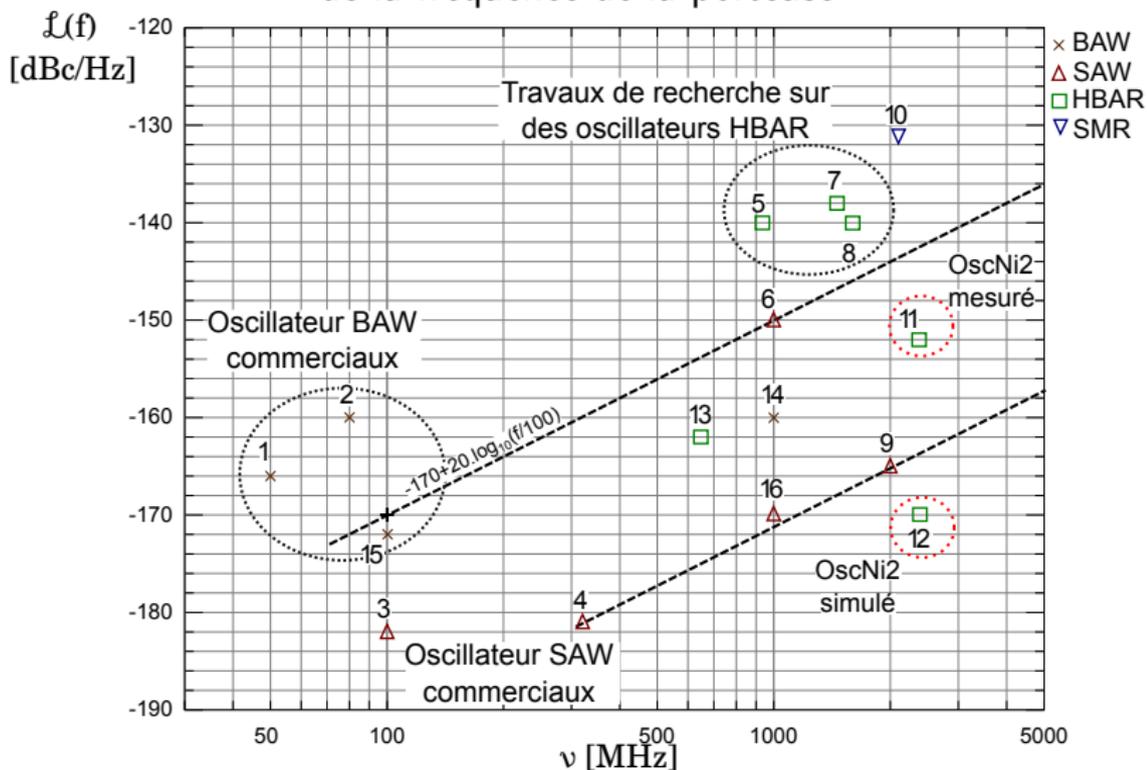
Méthode temps-réel



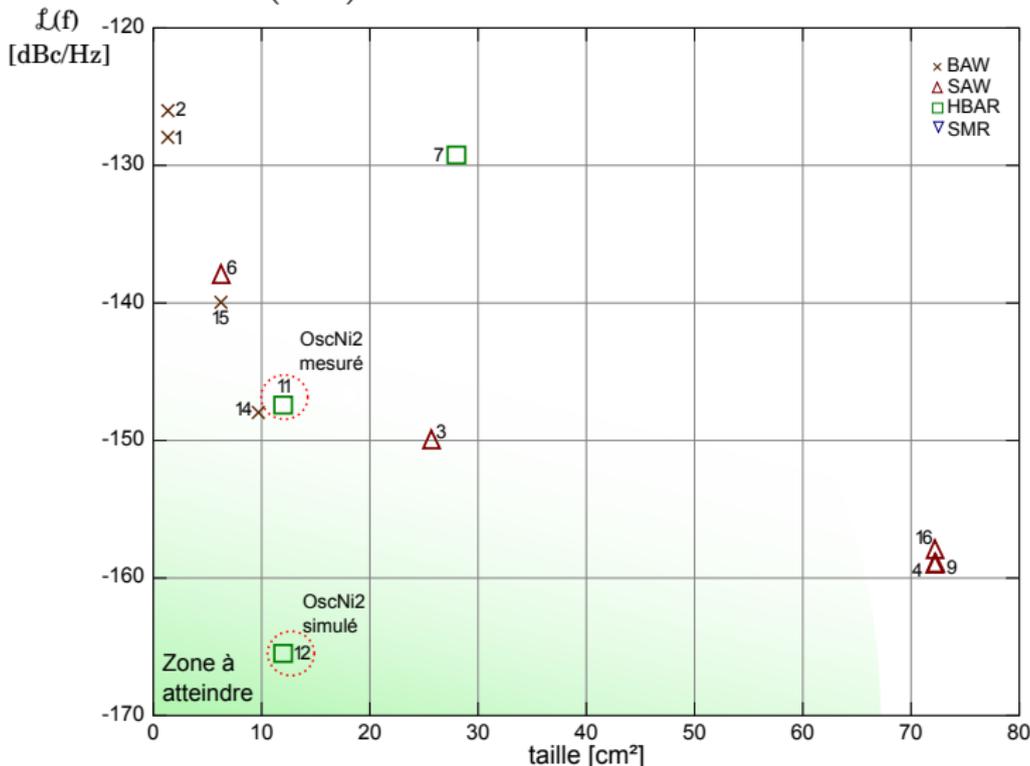
- échantillonnage à 500 MS/s
- bande passante max 250 kHz

- démonstration de l'importance du bruit de phase de l'oscillateur local sur la résolution de mesure par méthode RADAR
- réalisation d'oscillateurs à résonateur HBAR de $40 \times 30 \text{ mm}^2$, fonctionnant à 2,349 GHz et présentant un bruit de phase de -100 dBc/Hz à 1 kHz de la porteuse

Bruit de phase à 100 kHz de la porteuse en fonction de la fréquence de la porteuse



Bruits de phase à 100 kHz de la porteuse ramenés théoriquement à 4 GHz en ajoutant $20 \log_{10} \left(\frac{4 \cdot 10^9}{\nu} \right)$



- démonstration de l'importance du bruit de phase de l'oscillateur local sur la résolution de mesure par méthode RADAR
- réalisation d'oscillateurs à résonateur HBAR de $40 \times 30 \text{ mm}^2$, fonctionnant à 2,349 GHz et présentant un bruit de phase de -100 dBc/Hz à 1 kHz de la porteuse
- perspective d'amélioration du plancher de bruit de phase de 20 dB et plus de 10 dB pour les fréquences proches de la porteuse
- mise en place à FEMTO-ST d'une plateforme d'interrogation de ligne à retard SAW, flexible et reconfigurable, aux performances à l'état de l'art

N.
CHRÉTIENSystème
de mesure
RADARBruit de
phase et
résolution
de mesureOscillateur
à HBARÉlectroniques
d'interro-
gation

Conclusion

- [1] N. CHRÉTIEN, J.-M. FRIEDT et G. MARTIN :
Local oscillator phase noise limitation on the resolution of acoustic delay line wireless passive sensor measurement.
Review of Scientific Instruments, 85(6):065001, 2014.
- [2] G. GOAVEC-MÉROU, N. CHRÉTIEN, J.-M. FRIEDT, P. SANDOZ, G. MARTIN, M. LENCZNER et S. BALLANDRAS :
Fast contactless vibrating structure characterization using real time field programmable gate array-based digital signal processing : Demonstrations with a passive wireless acoustic delay line probe and vision.
Review of Scientific Instruments, 85(1):015109, 2014.
- [3] N. CHRÉTIEN, J.-M. FRIEDT, G. MARTIN et S. BALLANDRAS :
Acoustic transducers as passive sensors probed through a wireless radiofrequency link.
Instrumentation, Mesure, Métrologie, 13(3-4):159–178, 2013.
- [4] N. CHRÉTIEN, J.-M. FRIEDT, G. MARTIN et S. BALLANDRAS :
A stroboscopic approach to surface acoustic wave delay line interrogation.
In European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), 2013 Joint, pages 771–774. IEEE, 2013.
- [5] N. CHRÉTIEN, G. MARTIN, E. LEBRASSEUR, H. WANG, T. BARON, S. BALLANDRAS, E. HENAFF, F. TOMASO, M.-T. DELAYE, P.-P. LASSAGNE *et al.* :
Double-port AIN/Sapphire high overtone bulk acoustic resonators for the stabilization of radio-frequency oscillators.
In Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International, pages 2210–2213. IEEE, 2012.
- [6] N. CHRÉTIEN, J.-M. FRIEDT, B. FRANCOIS, G. MARTIN, . BALLANDRAS et P. VARSHNEY :
On the need for low phase noise oscillators for wireless passive sensor probing.
In SENSORDEVICES 2012, The Third International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, pages 119–125, 2012.
- [7] T. RÉTORNAZ, N. CHRÉTIEN, J.-M. FRIEDT, G. MARTIN et S. BALLANDRAS :
Time reversal : a flexible approach for identifying and measuring surface acoustic wave delay lines acting as wireless, passive sensors.
In International Frequency Control Symposium (IFCS), 2012 IEEE International. IEEE, 2012.