

Département Temps-Fréquence
Equipe Acousto-Electronique et Piézoélectricité (ACEPI)



Mesures du bruit propre de résonateurs MEMS

E. Vaillant, A. Pokharel, J. Imbaud and **F. Sthal**, FEMTO-ST
F. X. Esnault, G. Cibiél, CNES

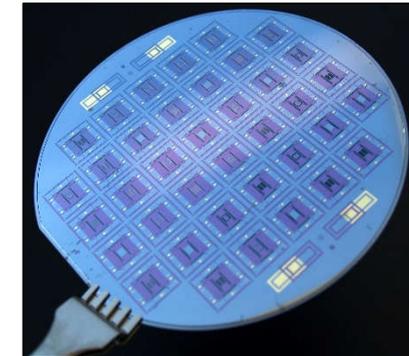
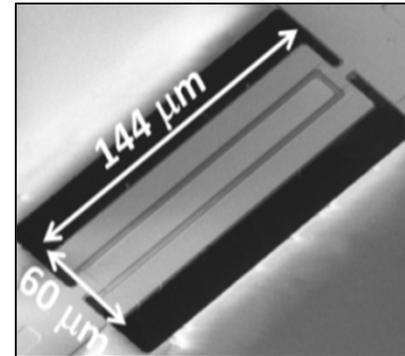
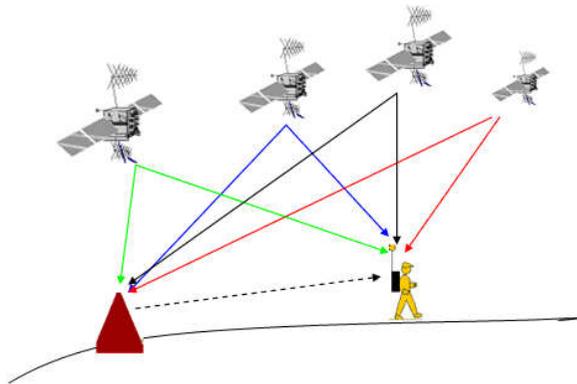
5^{ème} Journées Micro & Nano Technologies pour l'Inertiel
26-27 mars 2019, ONERA, Palaiseau



- I. Introduction et contexte (fondamentaux et outils)
- II. Présentation des résonateurs MEMS caractérisés
- III. Réalisation des bancs interférométriques de mesures
- IV. Mesures du bruit de phase des résonateurs
- V. Conclusion & Perspectives

- I. Introduction et contexte (fondamentaux et outils)
- II. Présentation des résonateurs MEMS caractérisés
- III. Réalisation des bancs interférométriques de mesures
- IV. Mesures du bruit de phase des résonateurs
- V. Conclusion & Perspectives

I. Introduction – actions R&T CNES



Global Navigation Satellite Systems (GNSS) ⇒ miniaturisation des systèmes ⇒ MEMS

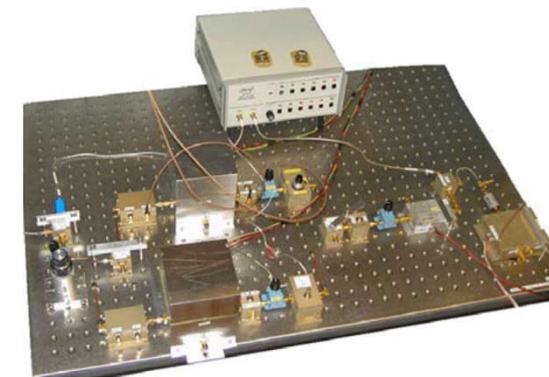
Collaboration FEMTO-ST / CNES
action R&T – résonateurs 5 MHz



Objectif : monter en fréquence



Gamme 5 MHz – 5 GHz

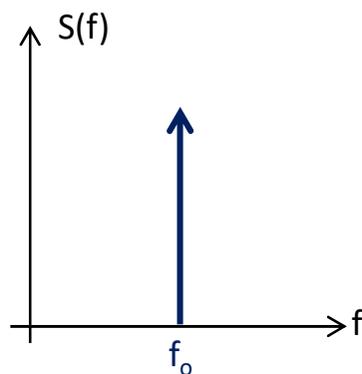
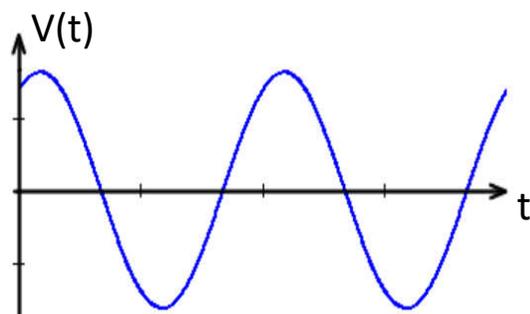


Banc de bruit de phase à 5 MHz*

*F. Sthal, X. Vacheret, S. Galliou, E. Rubiola, G. Cibieli, "Advanced bridge instrument for the measurement of the phase noise and of the short-term frequency stability of ultra-stable quartz resonators", IEEE IFCS-EFTF 2007

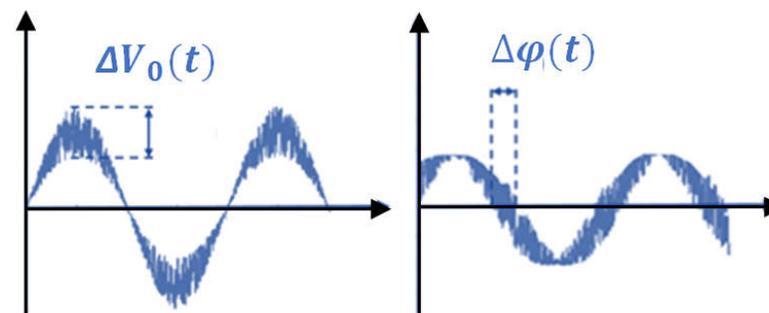
I. Introduction – bruit de phase

Signal idéal



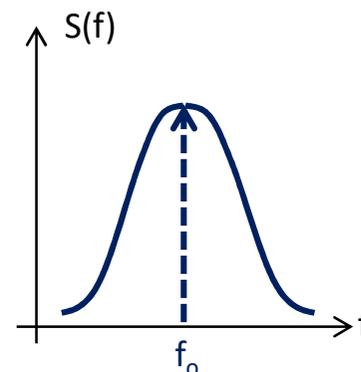
$$v(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 t)$$

Signal bruité



Bruit d'amplitude

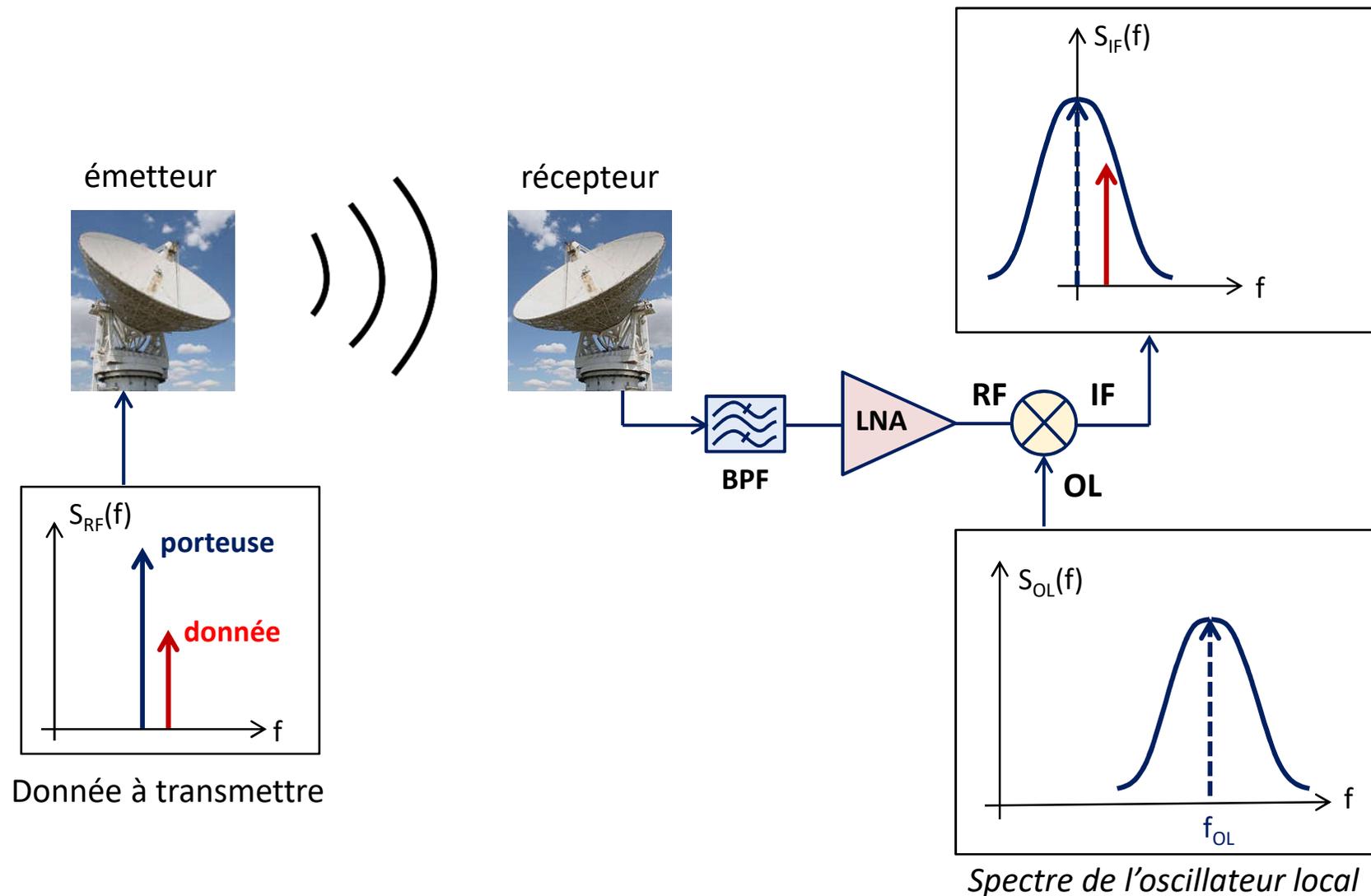
Bruit de phase



$$v(t) = (V_0 + \Delta V_0(t)) \sin(2\pi f_0 t + \Delta \varphi(t))$$

I. Introduction – impact

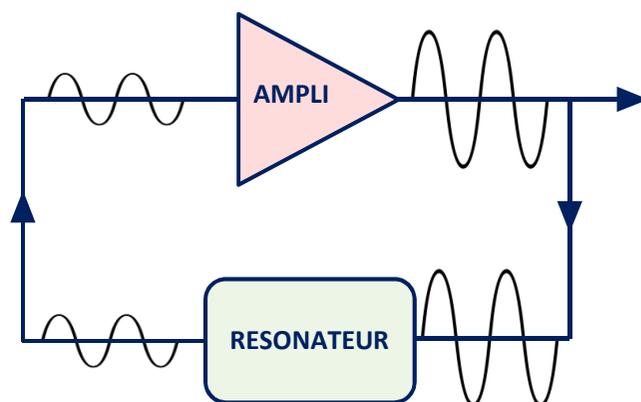
Schéma simplifié d'un récepteur radio



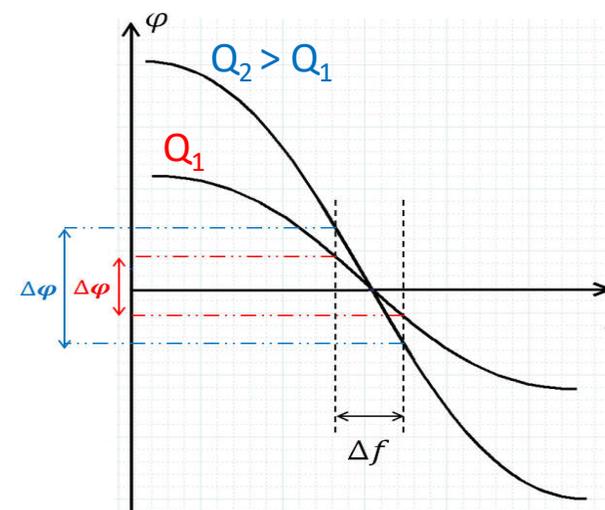
I. Introduction – impact

Pourquoi les résonateurs ?

- Le bruit de phase d'un oscillateur dépend du bruit de l'amplificateur et du résonateur.
- Un résonateur convertit des fluctuations de fréquence en fluctuations de phase.

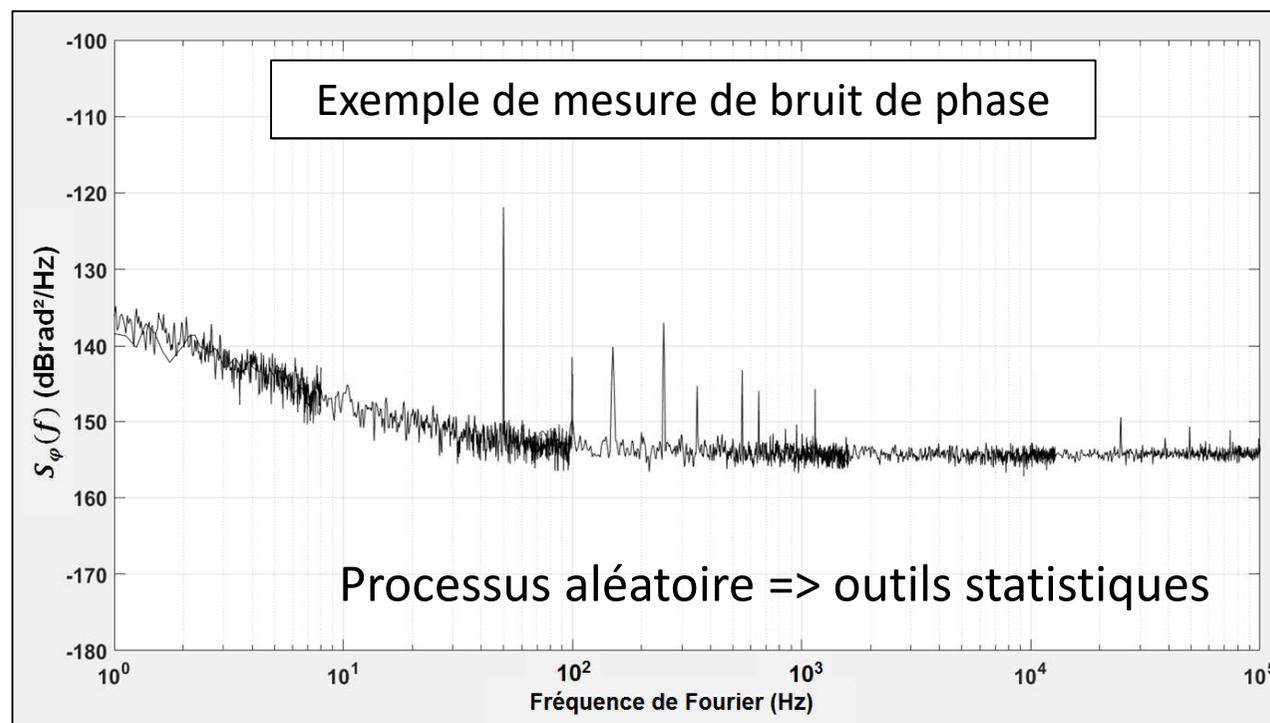


Modèle d'oscillateur



Caractéristique phase-fréquence
d'un résonateur

I. Introduction – outils



- $S_\varphi(f)$: Densité Spectrale de Puissance (DSP) des fluctuations de phase (dBrad²/Hz)
- $S_\varphi(f) = TF[R_{\varphi\varphi}(t, \tau)]$ (théorème de Wiener-Khinchin)
avec $R_{\varphi\varphi}(t, \tau)$ la fonction d'auto-corrélation de $\varphi(t)$
Hyp : Stationnarité + Ergodicité

I. Introduction – outils

Bruit de phase - **domaine fréquentiel**

DSP $S_\varphi(f)$ (dBrad²/Hz)



1/f flicker de fréquence des résonateurs

$$S_y(1 \text{ Hz}) = \left[\frac{F_L^2 + 1}{f_{res}^2} \right] S_\varphi(1 \text{ Hz}) \quad (F_L \text{ fréquence de Leeson})$$



Plancher de stabilité de l'oscillateur associé - **domaine temporel**

$$\sigma_{y_{floor}} = \sqrt{2 \ln(2) S_y(1 \text{ Hz})}$$

avec Variance d'Allan : $\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle [\bar{y}(t + \tau) - \bar{y}(t)]^2 \rangle$

$$y(t) = \frac{f(t) - f_0}{f_0} \quad \text{fluctuations relatives de fréquence}$$

*F. Sthal, J. Imbaud, X. Vacheret, P. Salzenstein, G. Cibiel, S. Galliou, "Computation method for the short-term stability of quartz crystal resonators obtained from passive phase noise measures", IEEE TUFFC, vol. 60, no. 7, July, pp. 1530-1532, 2013.

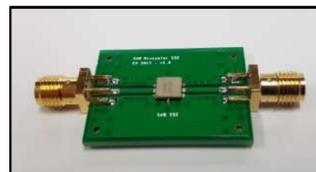
- I. Introduction et contexte (fondamentaux et outils)
- II. Présentation des résonateurs MEMS caractérisés
- III. Réalisation des bancs interférométriques de mesures
- IV. Mesures du bruit de phase des résonateurs
- V. Division de fréquence faible bruit
- VI. Conclusion & Perspectives

II. Résonateurs MEMS

BAW
Quartz
Actions CNES

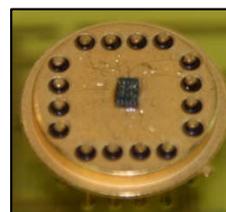


SAW
Surface Acoustic
Wave



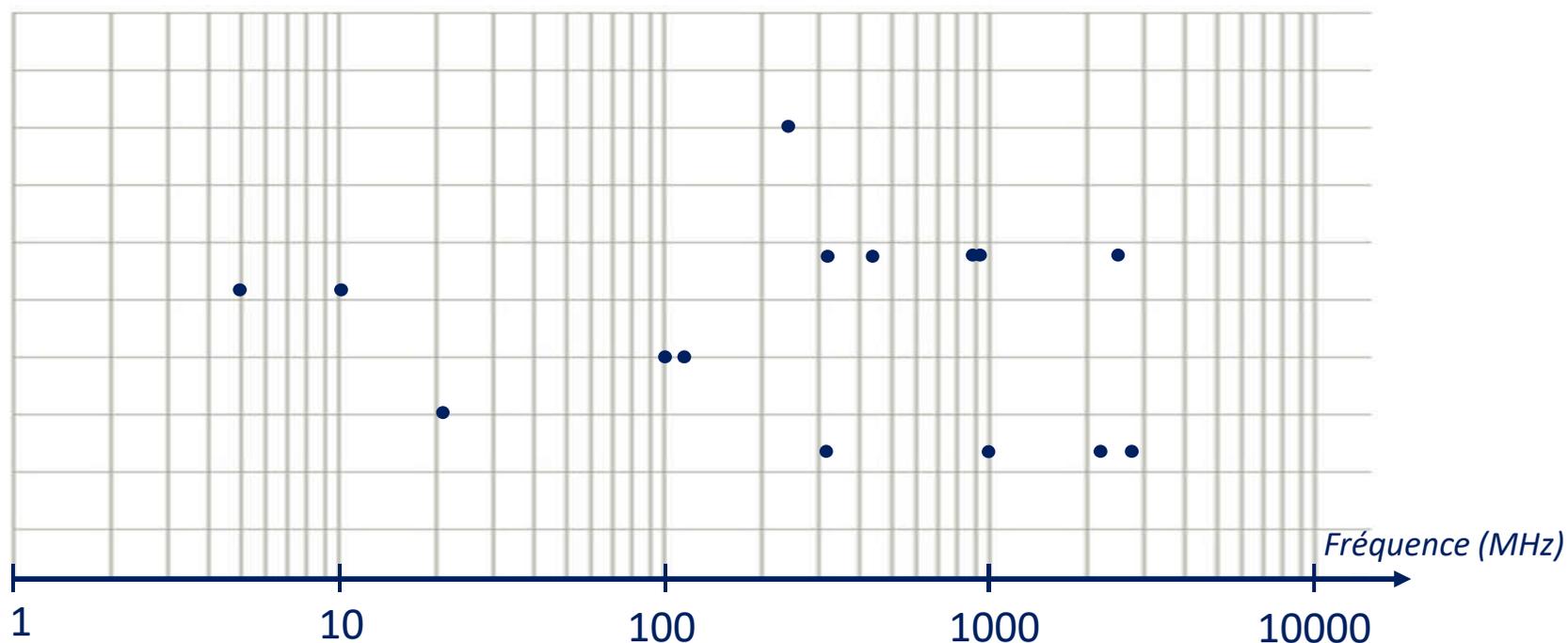
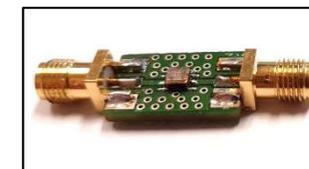
CMR⁽¹⁾
Contour Mode
Resonator

(1) courtoisie de G. Piazza



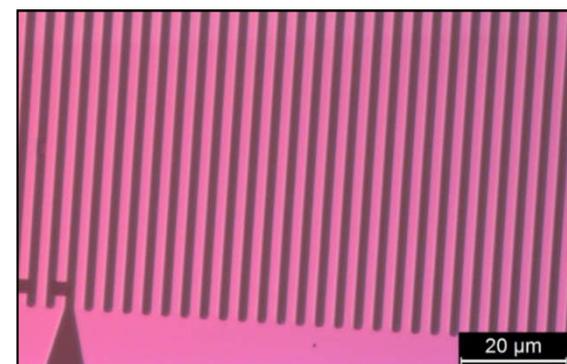
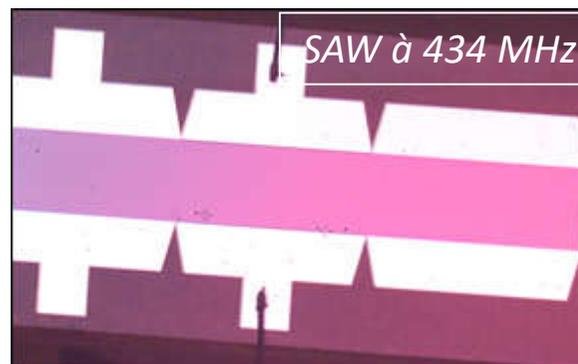
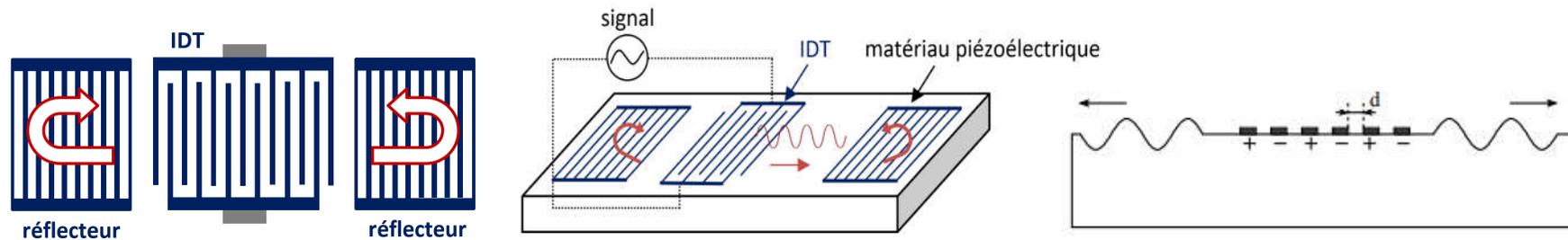
HBAR⁽²⁾
High Overtone Bulk
Acoustic Wave Resonator

(2) courtoisie de T. Baron



II. Résonateurs MEMS – SAW

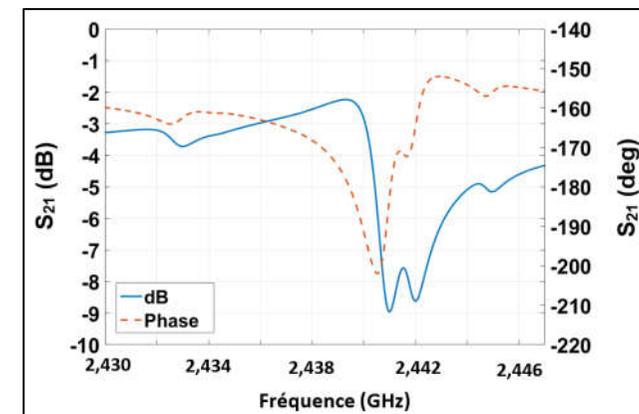
Surface Acoustic Wave (onde acoustique de surface)



$$f_0 = 2,4 \text{ GHz}$$

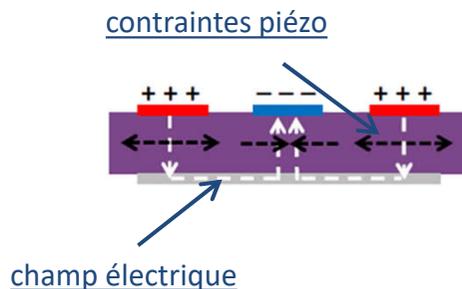
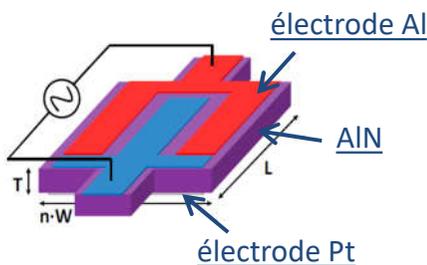


3x3 mm²

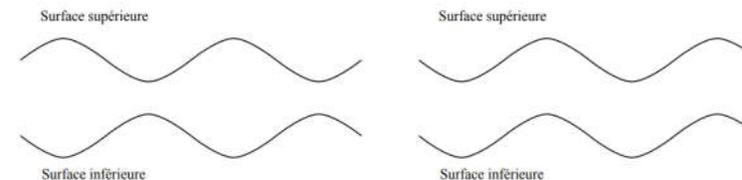


II. Résonateurs MEMS – CMR

Résonateur CMR à mode de contour*



Onde de Lamb :

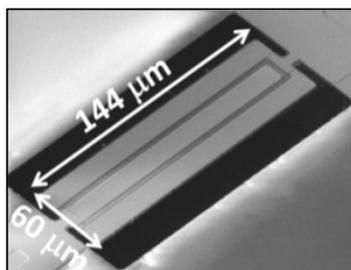


Mode symétrique

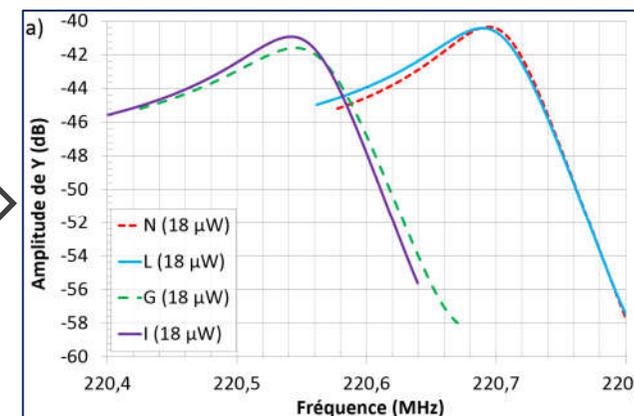
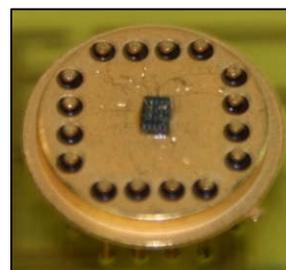
Mode asymétrique

$$f_0 = \frac{1}{2W} \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

$$f_0 = 220 \text{ MHz}$$



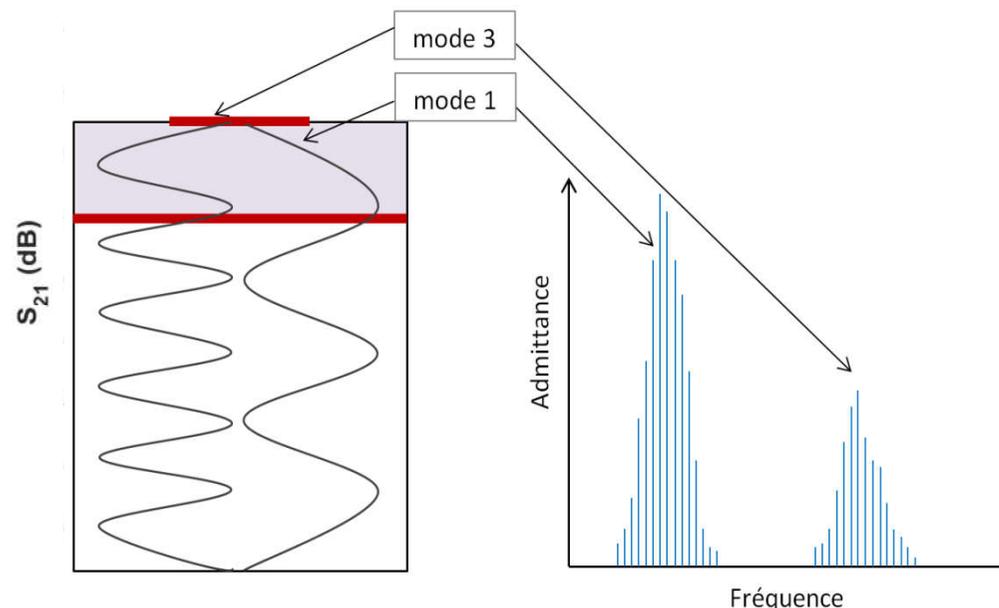
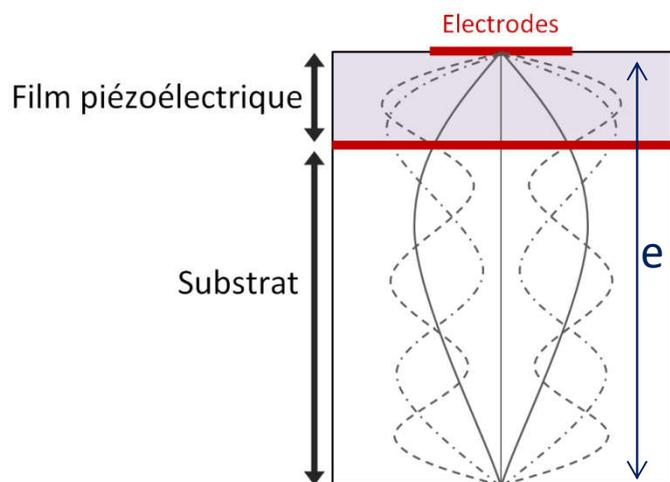
144x60 μm²



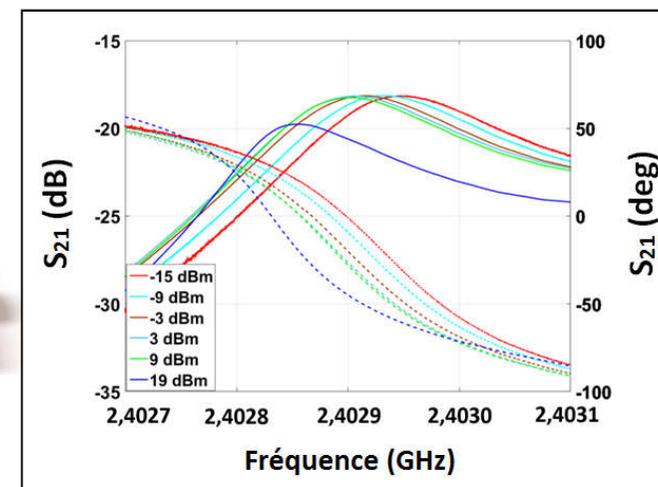
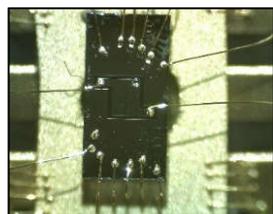
* J. Segovia-Fernandez, C. Cassella, G. Piazza, "Close-in phase noise reduction in an oscillator based on 222 MHz non-linear contour mode AIN resonators", IEEE EFTF/IFCS 2013, Prague, Czech Republic, 2013.

II. Résonateurs MEMS – HBAR

Résonateur HBAR*

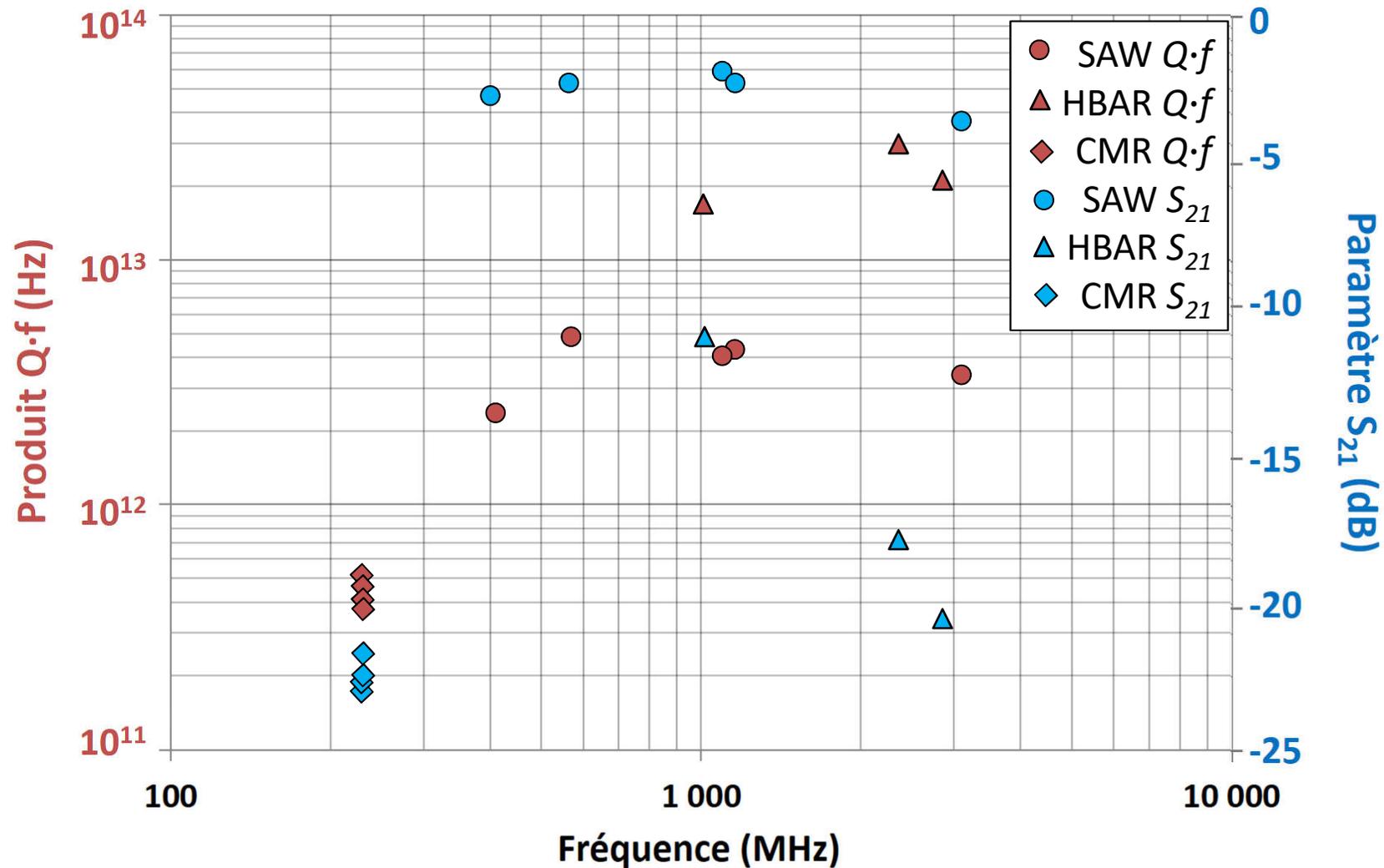


$$f_0 = \frac{nV}{2e} > 1GHz$$



* T. Baron, E. Lebrasseur, F. Bassignot, G. Martin, V. Pétrini, and S. Ballandras, "Chapter 13 High-Overtone Bulk Acoustic Resonator", Modeling And Measurement Methods For Acoustic Waves And For Acoustic Microdevices, 2013

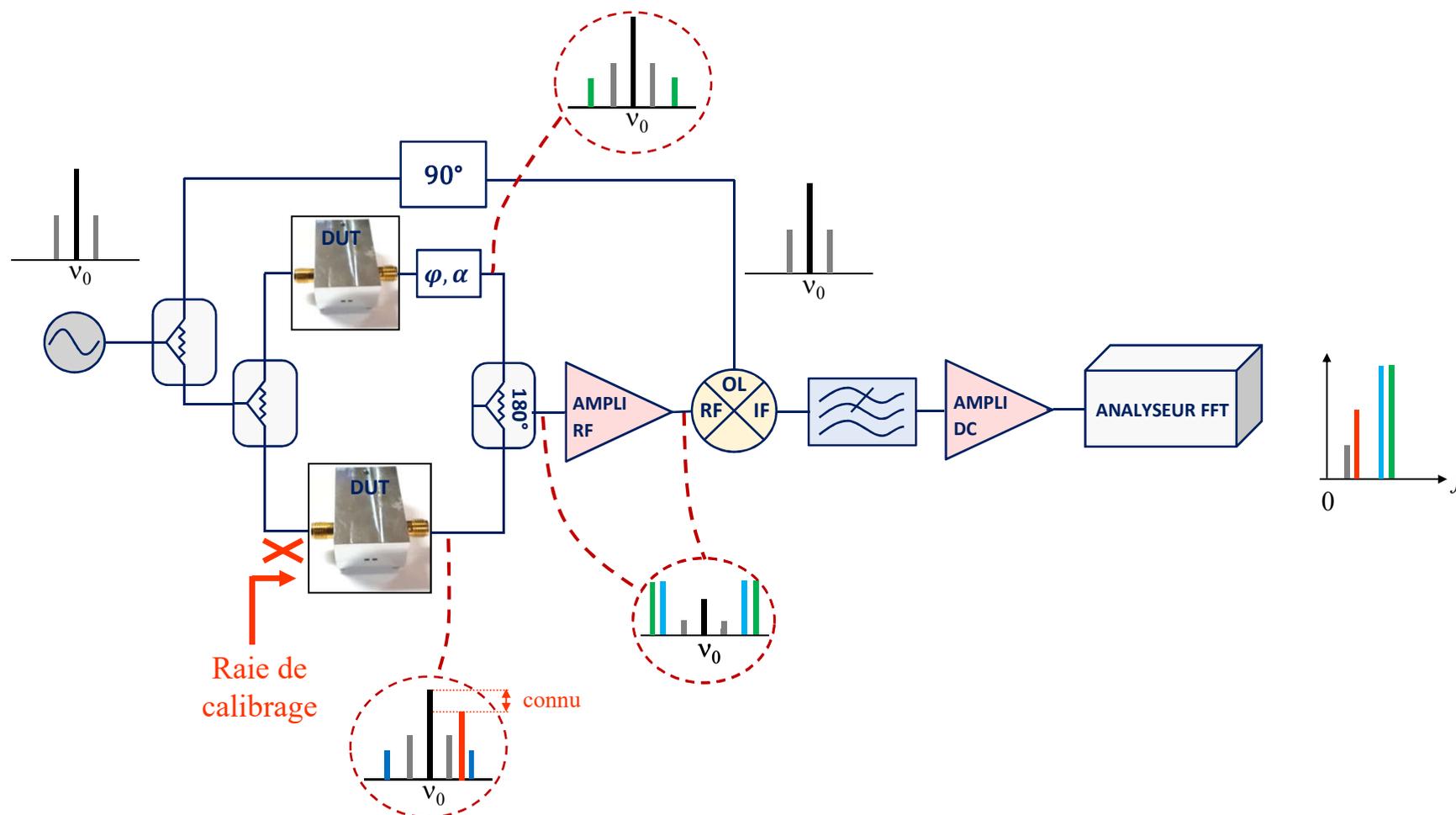
II. Résonateurs MEMS – synthèse



- I. Introduction et contexte (fondamentaux et outils)
- II. Présentation des résonateurs MEMS caractérisés
- III. Réalisation des bancs interférométriques de mesures
- IV. Mesures du bruit de phase des résonateurs
- V. Conclusion & Perspectives

III. Banc interférométrique - principe

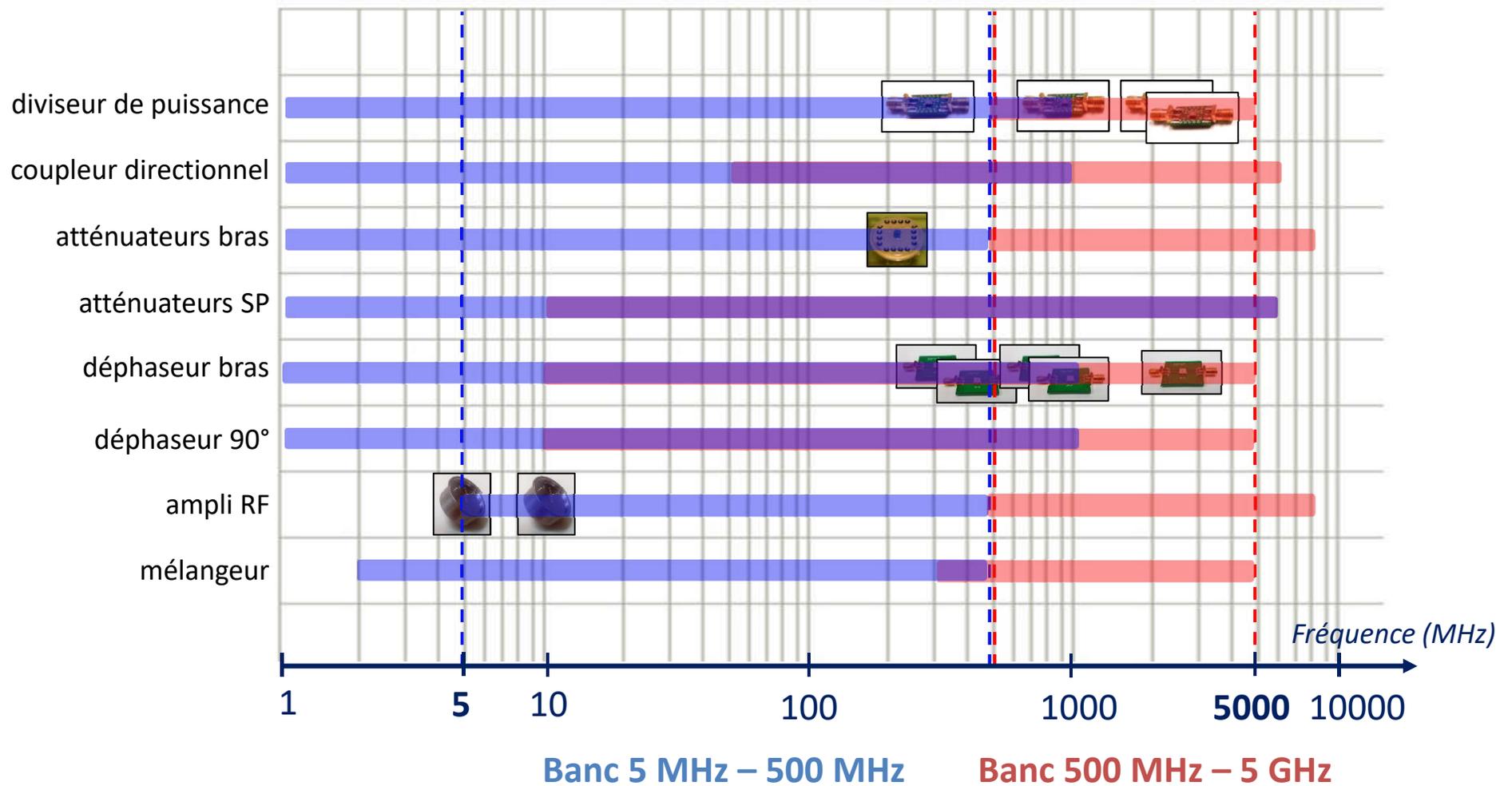
Principe du banc



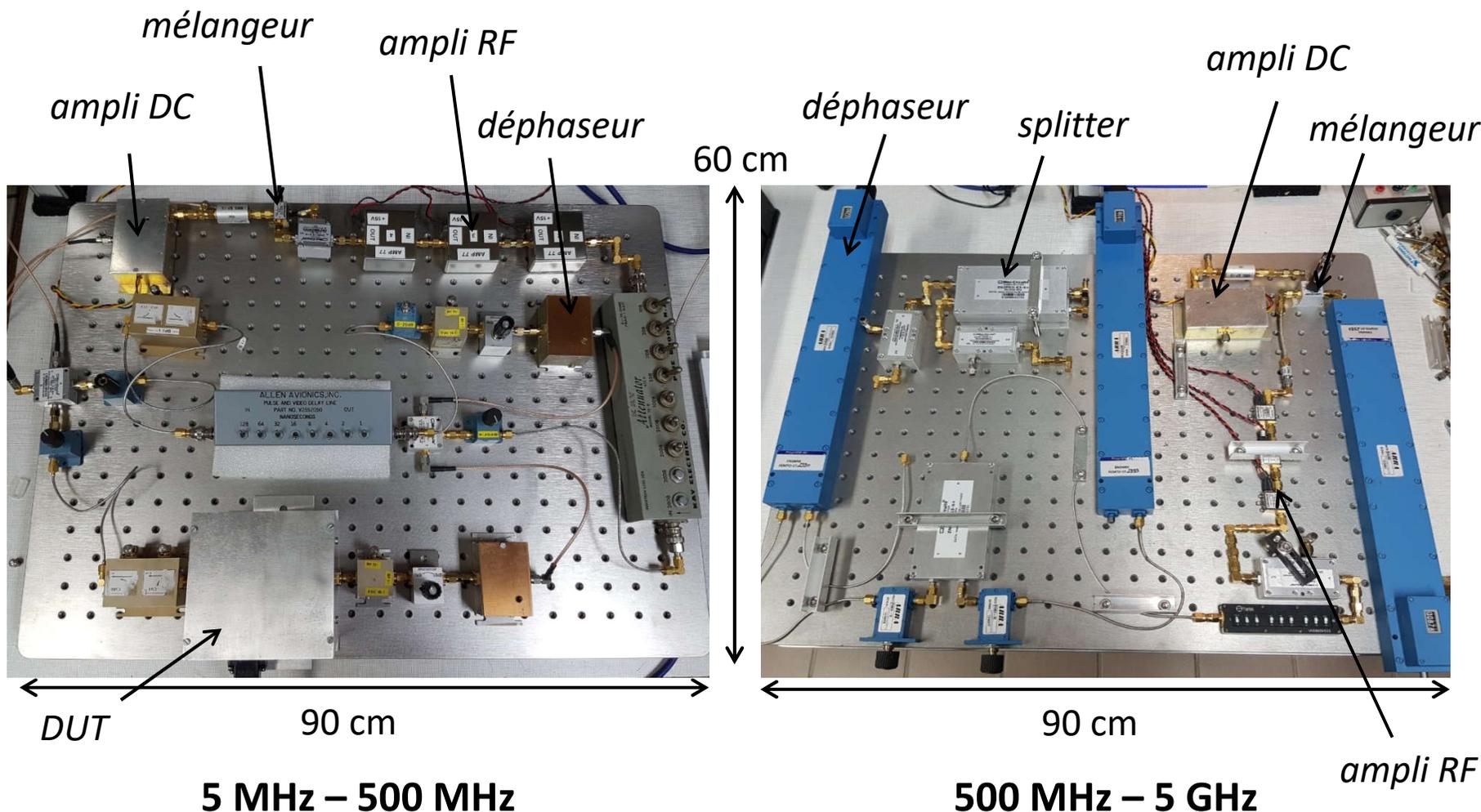
* E. Rubiola, V. Giordano, J. Gros Lambert, "Flicker Noise Meas. of HF Quartz Resonators", IEEE TUFFC, vol.47 (2), pp. 361-368, 2000

* F. Sthal & al, "Phase Noise Measurements of 10 MHz BVA Quartz Crystal Resonators", IEEE TUFFC, vol. 47, (2), pp. 369-373, 2000

III. Banc interférométrique – gammes de fréquences

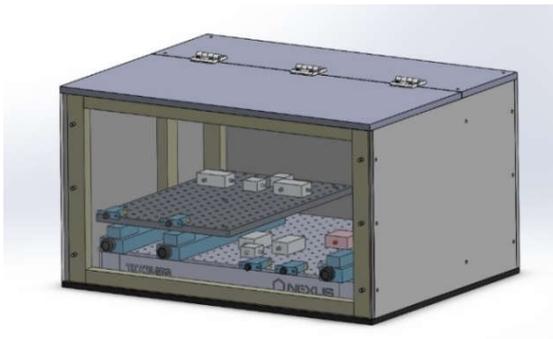


III. Banc interférométrique – réalisation

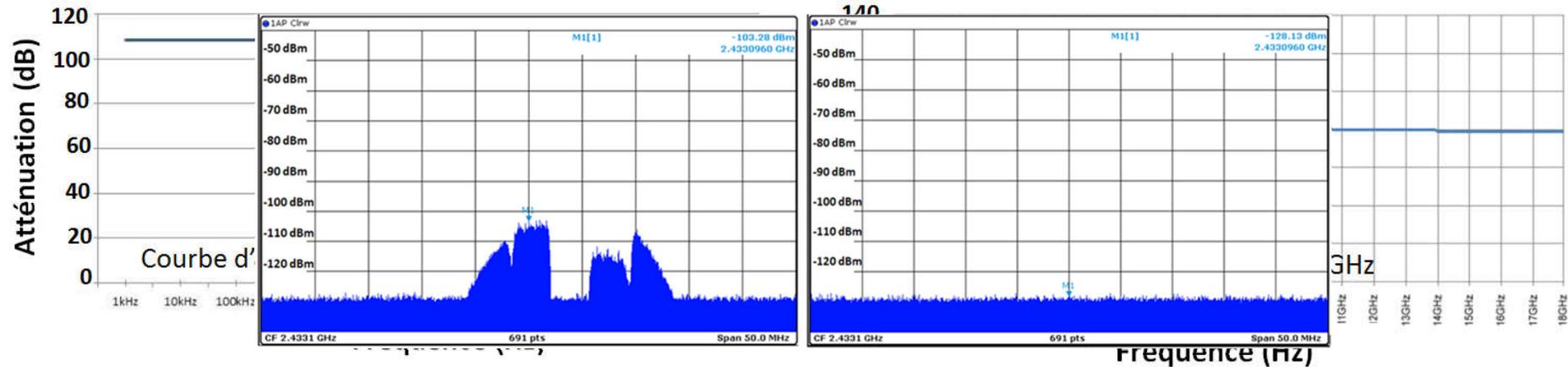


III. Banc interférométrique – réalisation

Enceinte d'isolation CEM pour banc 0,5-5 GHz

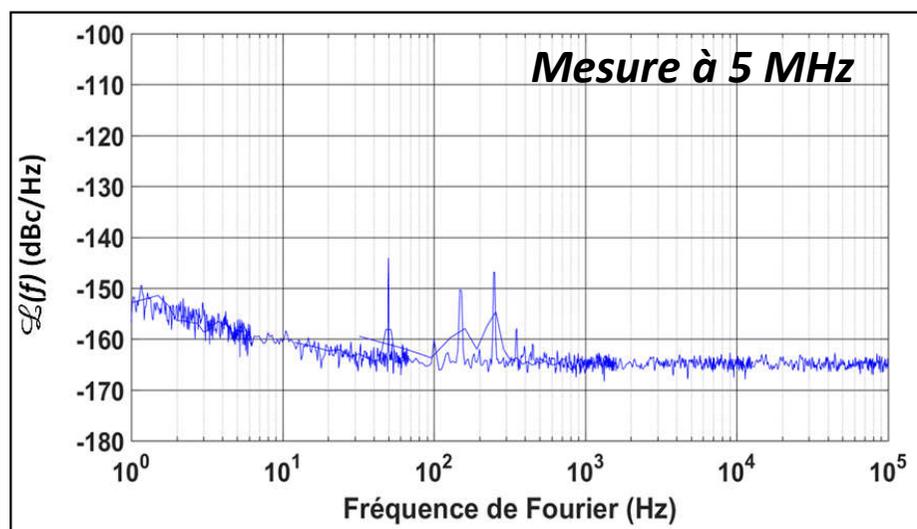


Perturbation du wifi

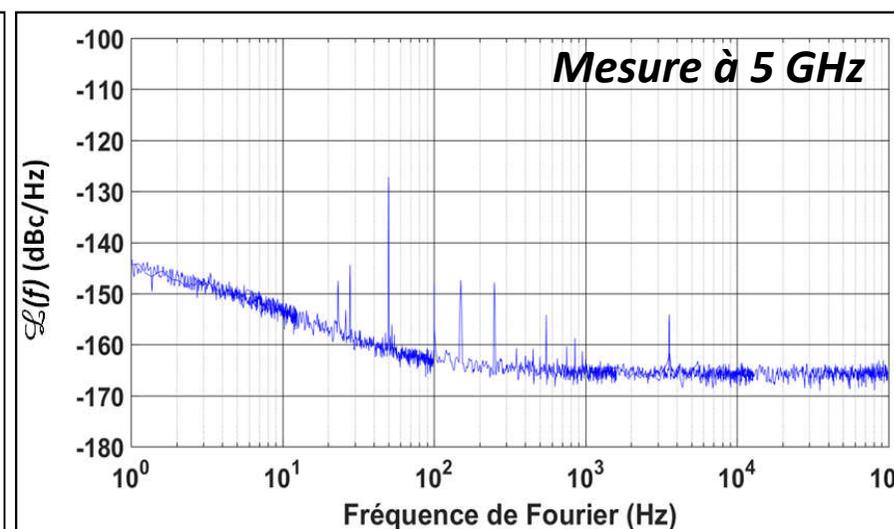


III. Banc interférométrique – planchers

Planchers des bancs de mesures



Banc 5 – 500 MHz

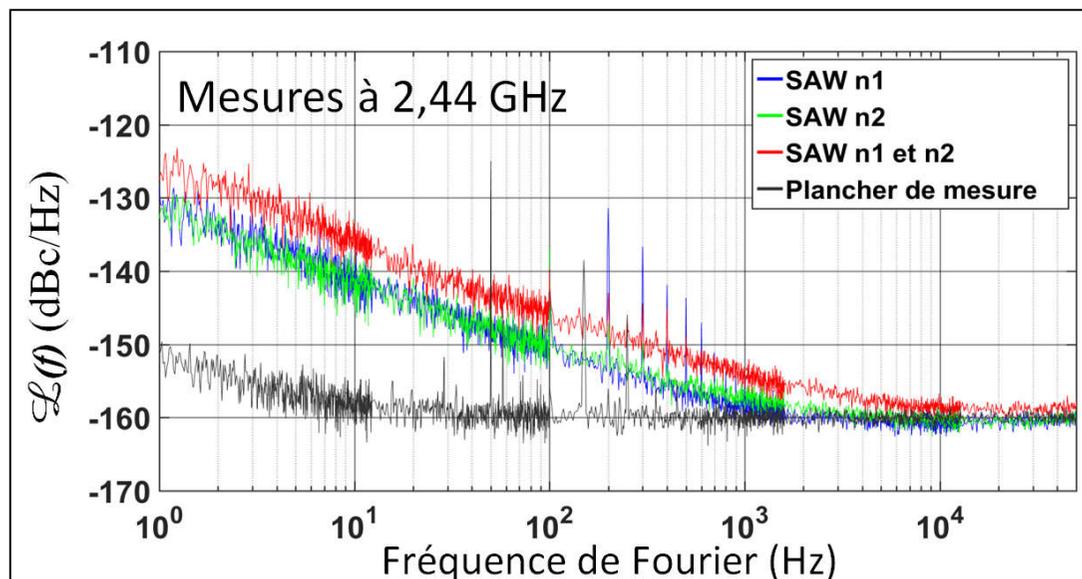


Banc 500 – 5000 MHz

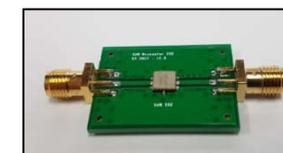
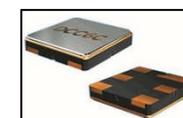
- I. Introduction et contexte (fondamentaux et outils)
- II. Présentation des résonateurs MEMS caractérisés
- III. Réalisation des bancs interférométriques de mesures
- IV. Mesures du bruit de phase des résonateurs
- V. Conclusion & Perspectives

IV. Bruit des résonateurs – SAW

Résonateurs SAW



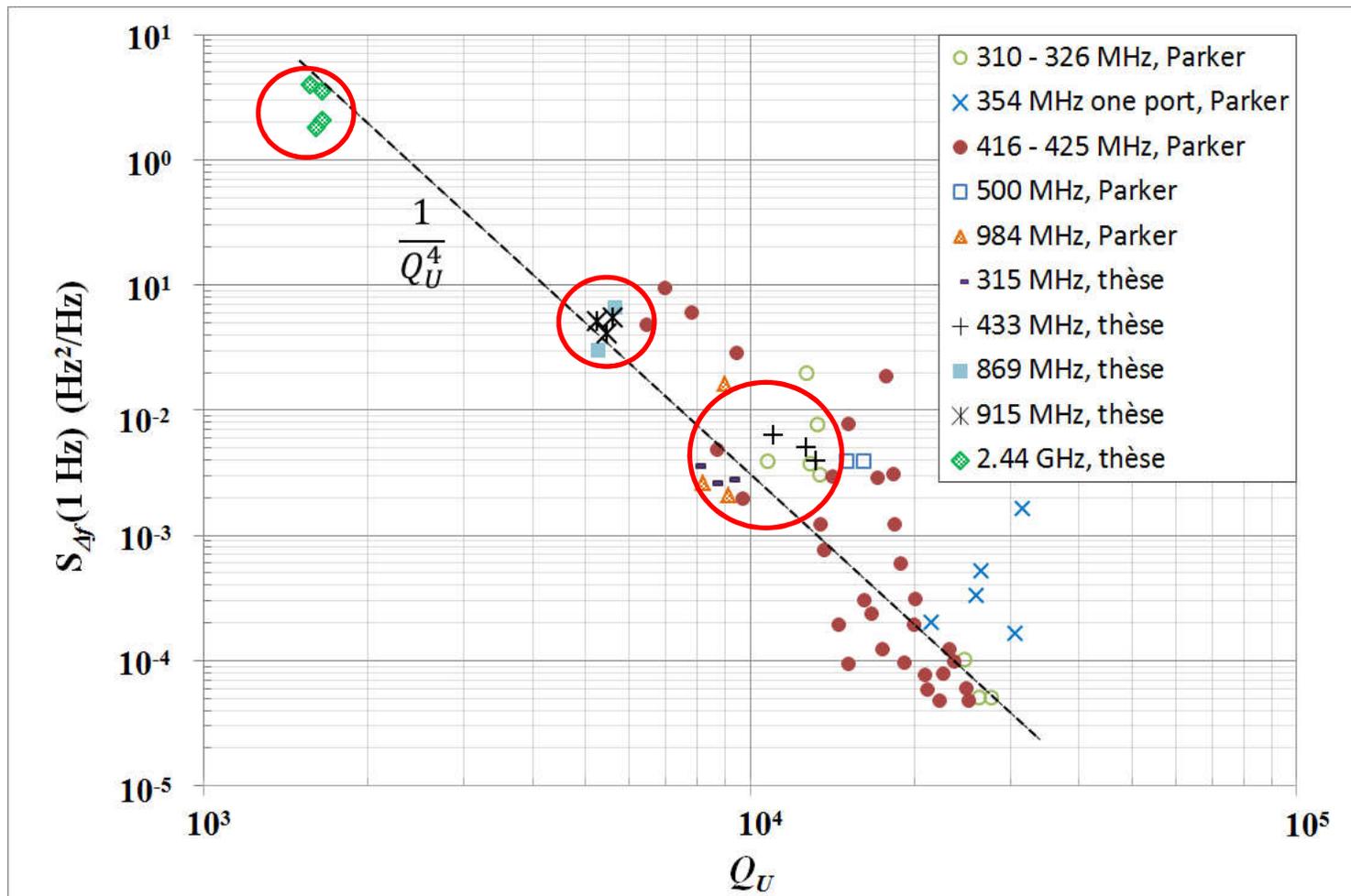
SAW	SR315	SR434	SR869	SR915	SR2442
f_0 (MHz)	314,979	433,964	868,362	914,841	2 439,330
Q_U	9272	13363	5687	5631	1646
$Q \cdot f$ (Hz)	$2,92 \cdot 10^{12}$	$5,80 \cdot 10^{12}$	$4,94 \cdot 10^{12}$	$5,15 \cdot 10^{12}$	$4,02 \cdot 10^{12}$
$S_\varphi(1 \text{ Hz})$ (dBrad ² /Hz)	-129,5	-130	-132	-133	-129,5
$\sigma_{y_{floor}}$	$1,96 \cdot 10^{-10}$	$1,69 \cdot 10^{-10}$	$3,49 \cdot 10^{-10}$	$2,60 \cdot 10^{-10}$	$6,92 \cdot 10^{-10}$



* E. Vaillant, F. Sthal, J. Imbaud, V. Pétrini, F. X. Esnault, G. Cibiel, "2.44 GHz Surface Acoustic Wave Resonator Phase Noise Measured by Carrier Suppression Technique", IEEE TUFFC, vol. 66, no. 1, January, pp. 247-250, 2019.

IV. Bruit des résonateurs – SAW

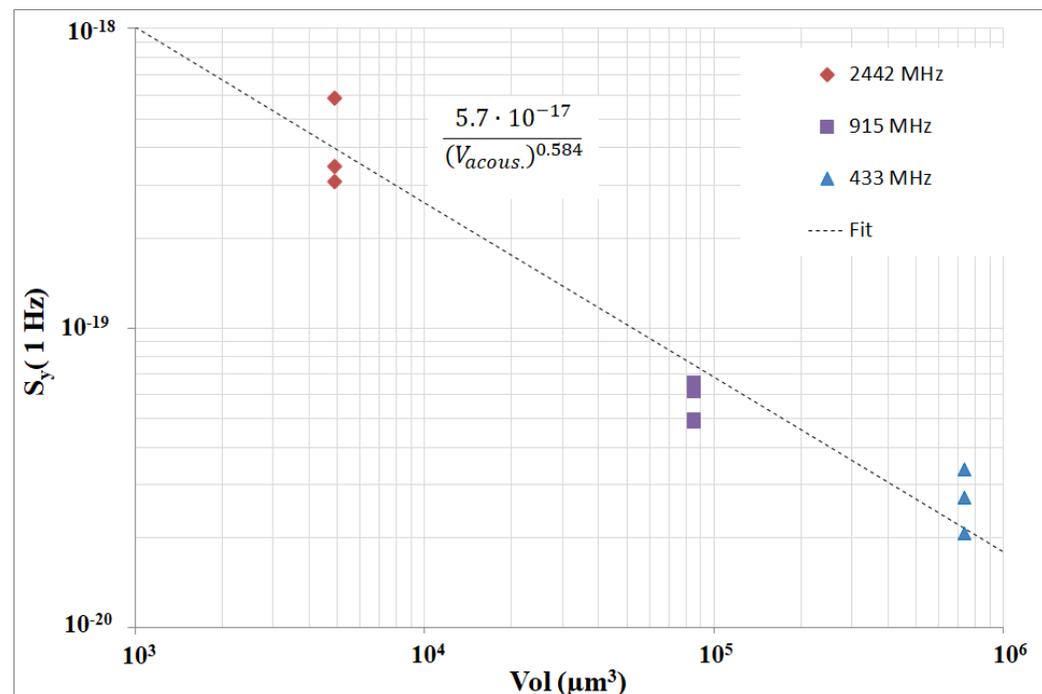
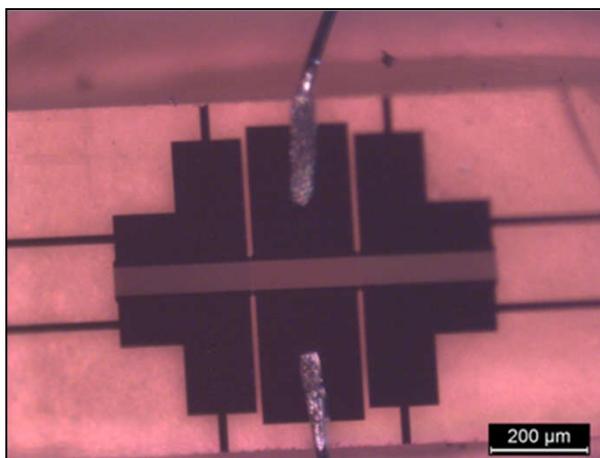
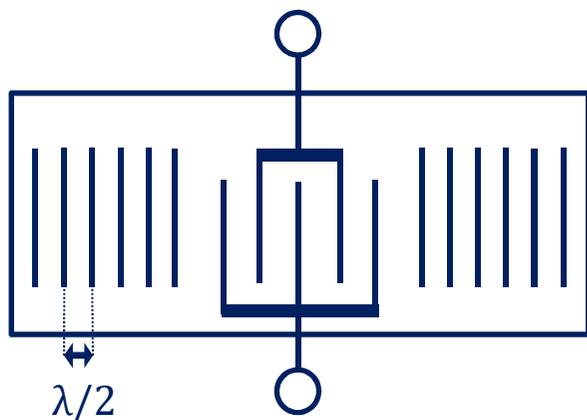
DSP fluctuations de fréquence en fonction du facteur de qualité



* T.E. Parker, *1/f frequency fluctuations in quartz acoustic resonators*, APL 46 (3), 1985

IV. Bruit des résonateurs – SAW

Considération du volume acoustique



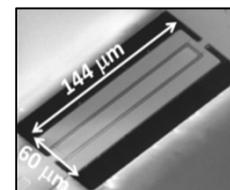
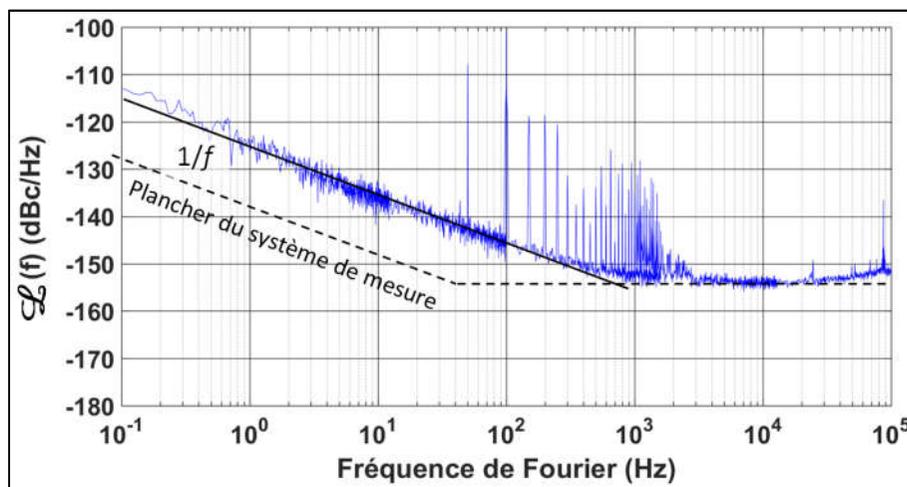
$$S_y(1\text{Hz}) = \frac{k}{(V_{acous.})^\alpha}$$

T.E. Parker, "1/f frequency fluctuations in quartz acoustic resonators", APL 46 (3), 1985

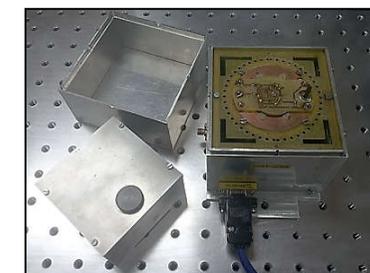
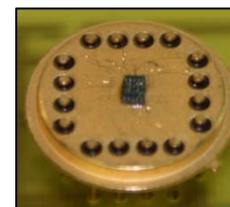
E. Vaillant, F. Sthal, J. Imbaud, V. Pétrini, F. X. Esnault, G. Cibiel, "2.44 GHz Surface Acoustic Wave Resonator Phase Noise Measured by Carrier Suppression Technique", IEEE TUFFC, vol. 66, no. 1, January, pp. 247-250, (2019).

IV. Bruit des résonateurs – AIN CMR

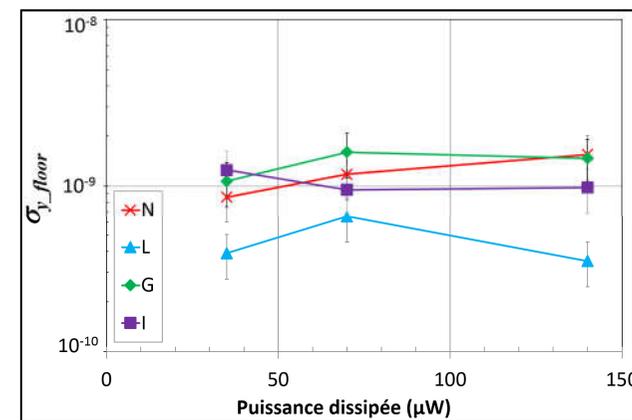
Résonateurs AIN à mode de Contour



Carnegie
Mellon
University



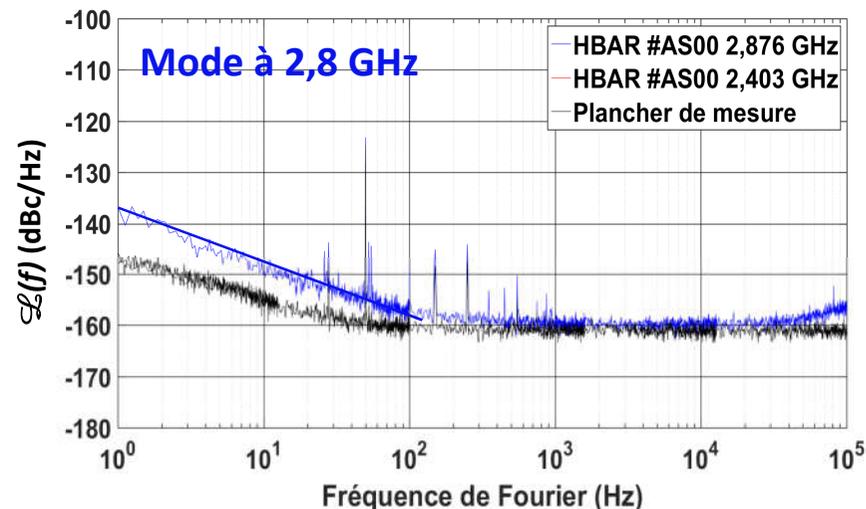
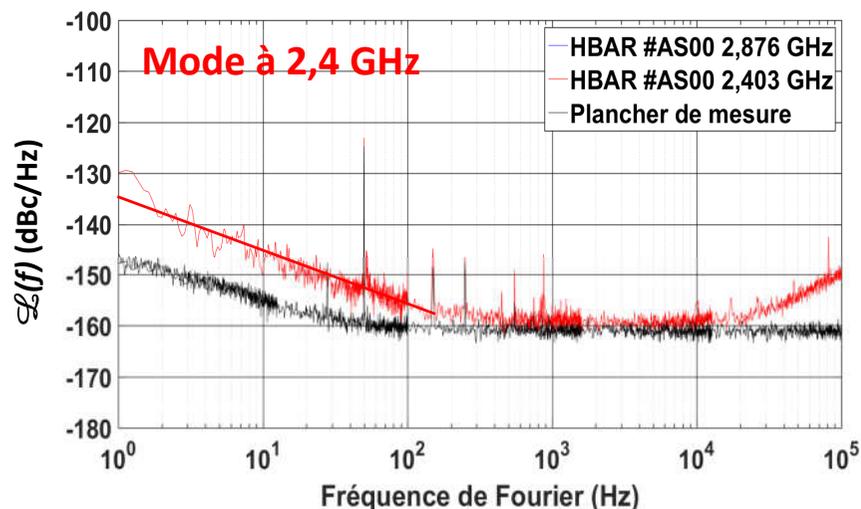
Puissance	140 μW			
Résonateur	L	I	N	G
f_0 (MHz)	220,980	221,140	221,020	221,100
Q_U	2 867	2 920	3 140	2 613
$Q \cdot f$ (Hz)	$6,34 \cdot 10^{11}$	$6,46 \cdot 10^{11}$	$6,94 \cdot 10^{11}$	$5,78 \cdot 10^{11}$
$S_\varphi(1 \text{ Hz})$ (dBrad ² /Hz)	-122	-110	-109	-110
$\sigma_{y \text{ floor}}$	$0,35 \cdot 10^{-9}$	$0,98 \cdot 10^{-9}$	$1,55 \cdot 10^{-9}$	$1,47 \cdot 10^{-9}$



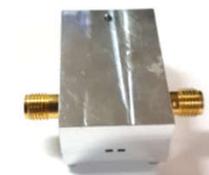
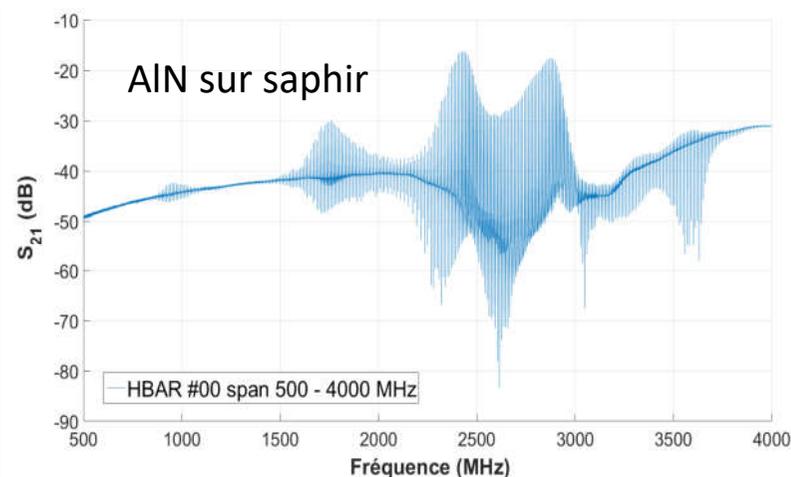
* E. Vaillant, F. Sthal, J. Imbaud, V. Soumann, P. Abbe, L. Arapan, F. X. Esnault, G. Cibiel, J. Segovia-Fernandez, G. Piazza, "Phase Noise Measurements of AIN Contour-Mode Resonators with Carrier Suppression Technique", IEEE TUFFC, vol. 65, no. 10, October, pp. 1943-1950, 2018.

IV. Bruit des résonateurs – HBAR

Résonateurs HBAR



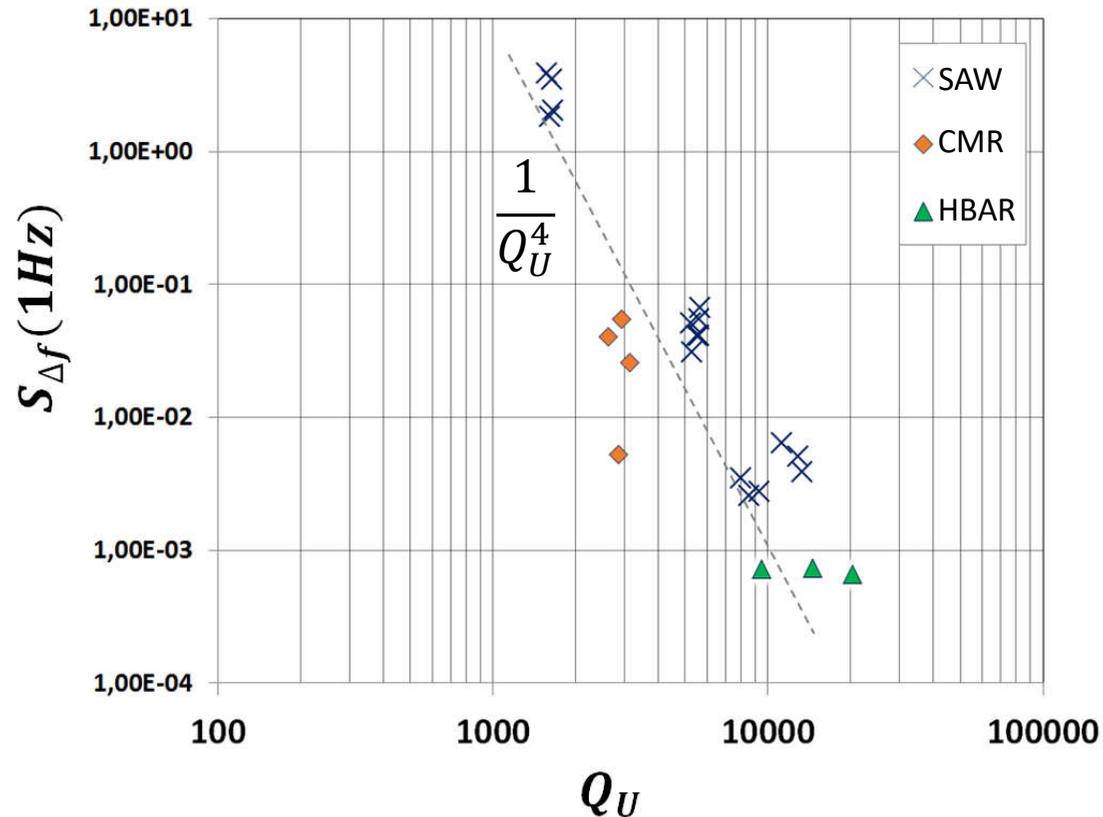
HBAR	#AS00	#AS00
f_0 (GHz)	2,4029	2,8763
F_L (kHz)	92	103
Q_U	12 541	8 496
$Q \cdot f$ (Hz)	$3,01 \cdot 10^{13}$	$2,44 \cdot 10^{13}$
$S_\varphi(1 \text{ Hz})$ (dBrad ² /Hz)	-135	-139
$\sigma_{y_{floor}}$	$1,33 \cdot 10^{-11}$	$1,10 \cdot 10^{-11}$



Col. avec



IV. Bruit des résonateurs



Sommaire

- I. Introduction et contexte (fondamentaux et outils)
- II. Présentation des résonateurs MEMS caractérisés
- III. Réalisation des bancs interférométriques de mesures
- IV. Mesures du bruit de phase des résonateurs
- V. Conclusion & Perspectives

Conclusion et perspectives

Bancs de mesures

- ✓ Bancs de mesure de bruit de phase entre 5 MHz et 5 GHz opérationnels, basé sur la technique interférométrique

Mesures de résonateurs

- ✓ Mesures de résonateurs CMR (stabilité de quelques 10^{-9} - 10^{-10})
- ✓ Mesures de résonateurs SAW (stabilité de quelques 10^{-10})
- ✓ Mesures de résonateurs HBAR (stabilité de quelques 10^{-11})

Perspectives

- Compléter les mesures des HBAR
 - Mesures de nombreux harmoniques
 - Dispositifs dont les paramètres de fabrication sont connus et maîtrisés à FEMTO
- Mesurer des dispositifs autour de 5 GHz
- Détermination des origines du bruit propre des résonateurs



Merci pour votre attention !



ANR-10-LABX-48-01



ANR-11-EQPX-0033-OSC-IMP



RENATECH - MIMENTO
French national nanofabrication network



ANR-17-EURE-0002

