

**Département Temps - Fréquence**

# **Soutenance de thèse de Joël IMBAUD**

**Evaluation des potentialités des matériaux  
du type langasite pour la réalisation  
d'oscillateurs ultra-stables.**

**Etude et réalisation préliminaires d'un  
oscillateur cryogénique.**

**25 novembre 2008**

# Plan de la présentation

## Introduction générale

### Généralités

Types de résonateurs

Oscillateur Colpitts

Stabilité - bruit

#### 1<sup>ère</sup> partie : Oscillateur LGT

Introduction

Fabrication de prototypes

Paramètres des résonateurs LGT

Mise au point de l'oscillateur et de  
l'ensemble thermique

Mesures des oscillateurs et analyses

Conclusion 1<sup>ère</sup> partie

#### 2<sup>ème</sup> partie : Oscillateur cryogénique

Introduction

Présentation de l'ensemble expérimental

Mesures de résonateurs

Mesures de transistors et modélisation

Mise au point de l'oscillateur

Mesures de bruit et analyses des limitations

Conclusion 2<sup>ème</sup> partie

## Conclusion générale

# Introduction générale

Utilisation des oscillateurs ultra-stables (OUS) dans les domaines :

- Des télécommunications
- De la métrologie
- Du positionnement / navigation
- Du domaine spatial en général
- ...

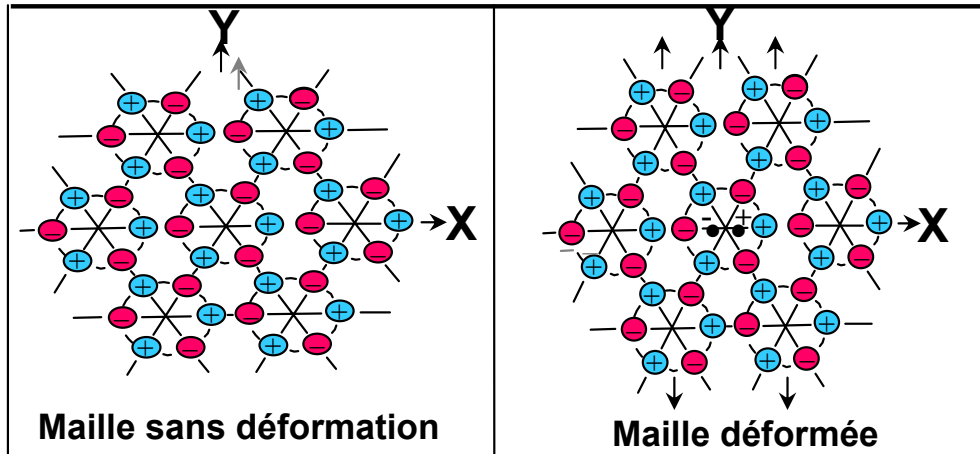


- Les oscillateurs à résonateurs à ondes de volume sont avantageux en termes de stabilité sur les temps courts.
- Accroissement des demandes et des exigences impliquant de meilleures maîtrises et performances des OUS.



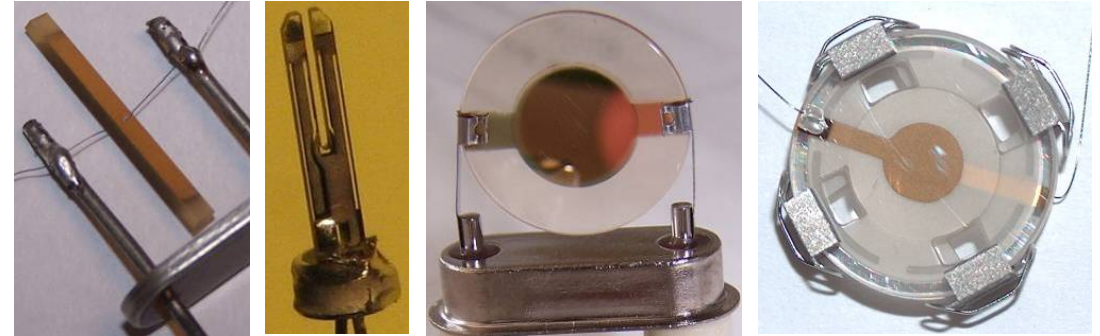
# Généralités

# Généralités : Types de résonateurs



Effet piézoélectrique : Polarisation des mailles atomiques sous l'effet d'une déformation

La piézoélectricité établit le lien entre les mondes mécanique et électrique



Différents types de résonateurs acoustiques à ondes de volume

Les paramètres de tels résonateurs sont sensibles à :

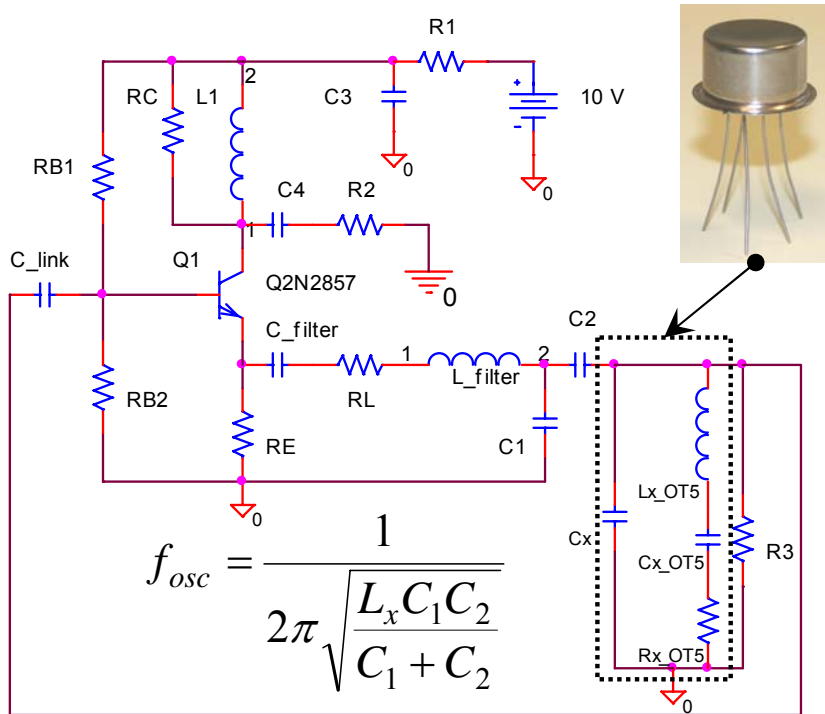
- L'orientation de la coupe / axes cristallographiques (SC, LD, BT...)
- Le piégeage d'énergie (rayon de courbure, épaisseur des électrodes...)
- La qualité du matériau utilisé et procédé de fabrication

Le mode privilégié est le cisaillement d'épaisseur

$$f_n^2 = \frac{n^2}{4e^2} \frac{\bar{\epsilon}}{\rho_0} \left( 1 - 8 \frac{k_\alpha^2}{n^2 \pi^2} \right)$$

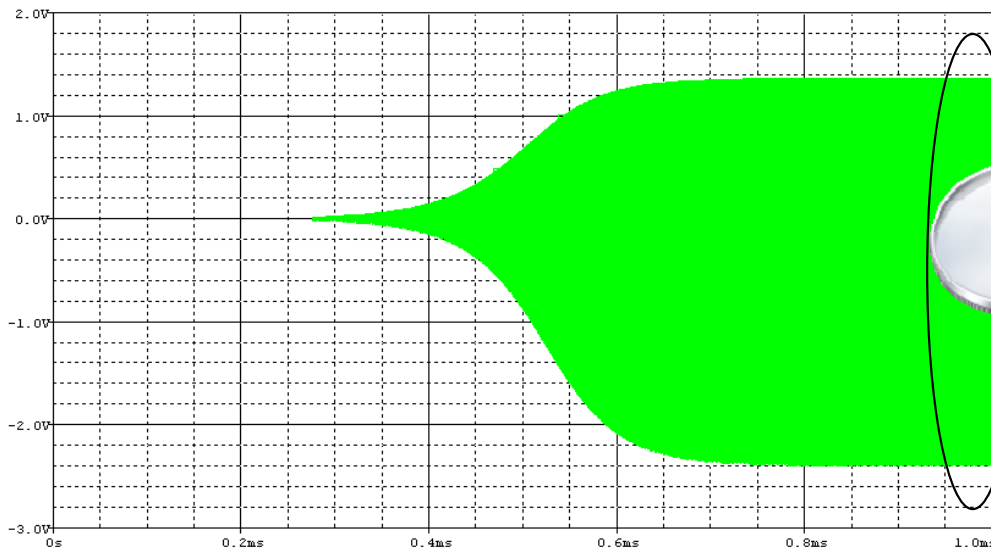
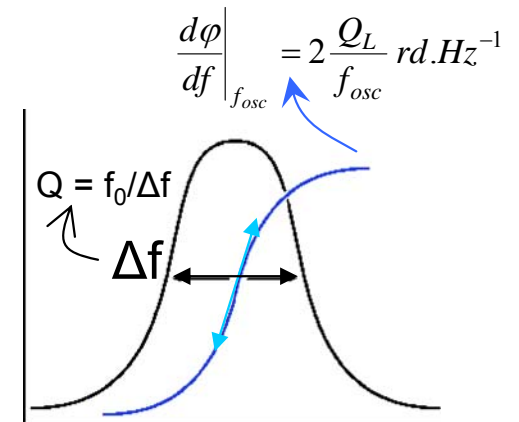
(nombre de nœuds → rang de partiel n)

# Généralités : Oscillateur Colpitts

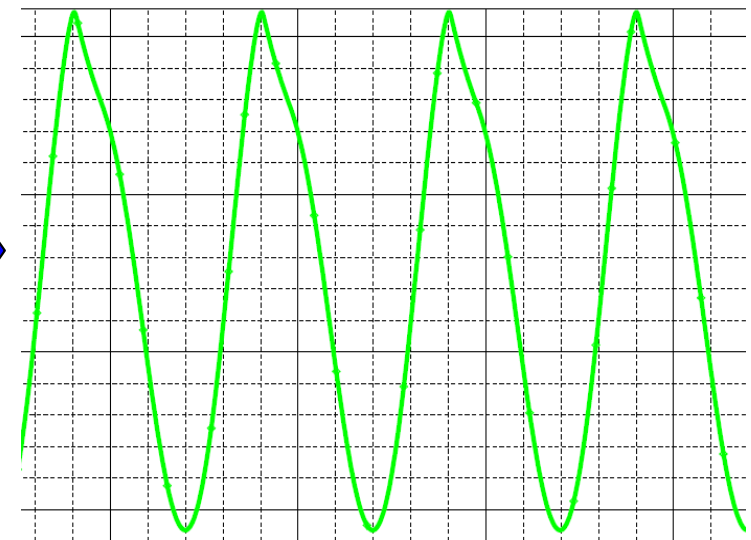


Avantage de l'oscillateur Colpitts :

- Peu d'éléments
- Peu sensible au bruit de phase paramétrique
- Performances
- Maîtrise du Q en charge



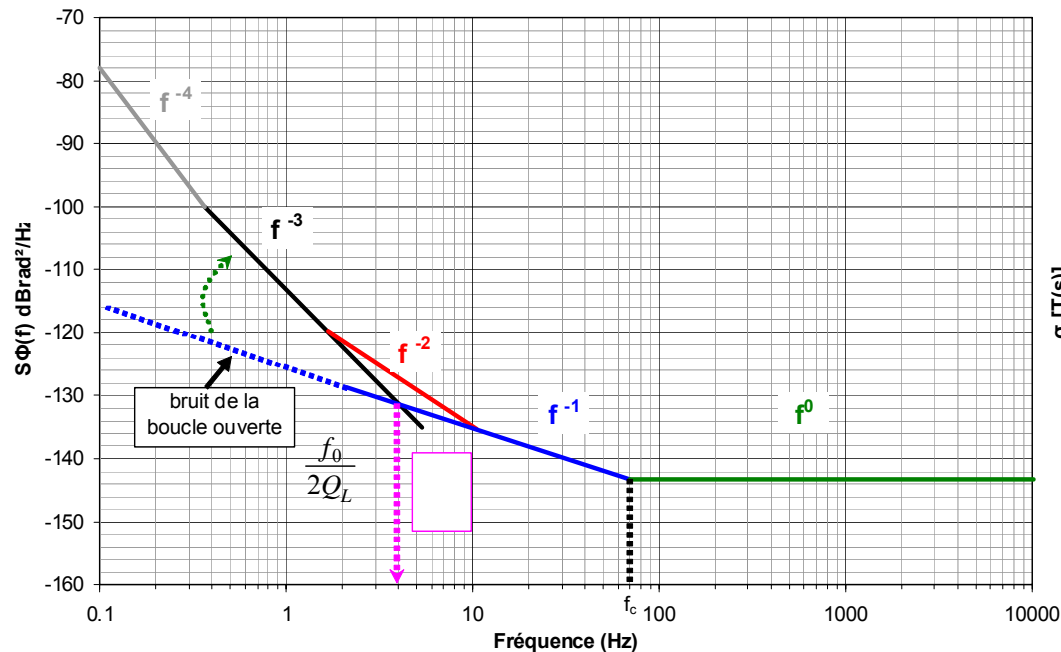
Amplitude du signal de sortie



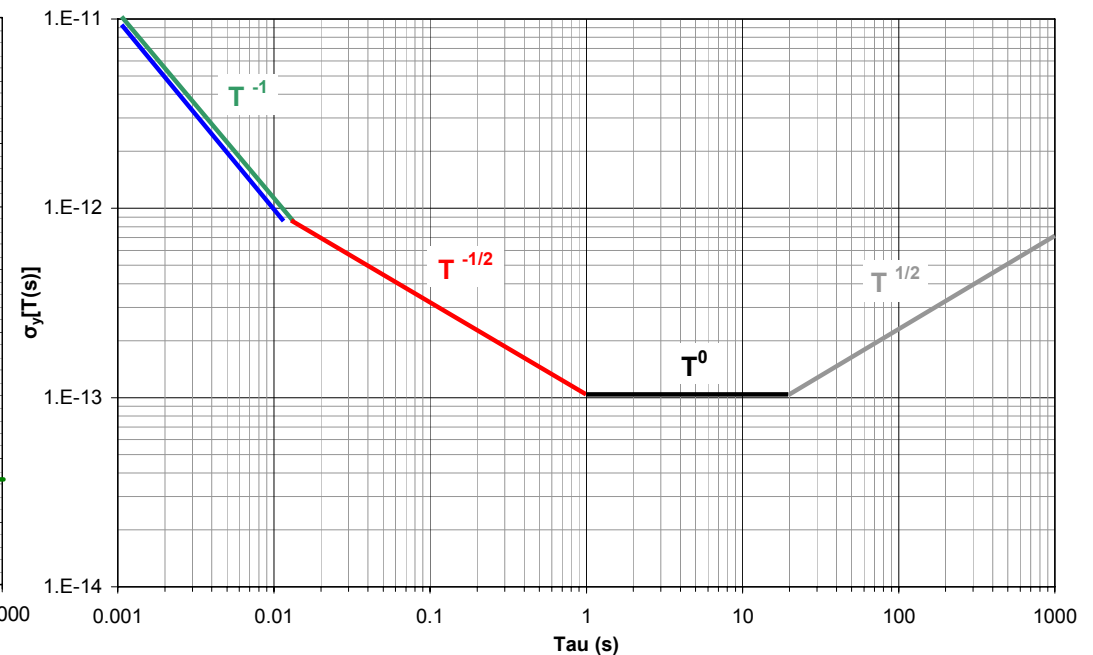
# Généralités : Stabilité - bruit

La fréquence de travail est de 10MHz dans la gamme RF :

- $f_{\text{Leeson}} < f_{\text{coin}}$  (fort Q + 10 MHz)
- bruit proche de la porteuse limité par le résonateur
- plancher limité par l'électronique



DSP des fluctuations de phase  $S_{\phi}(f)$



Ecart type (variance d'Allan)

$\sigma_y[\tau(\text{s})]$

**Stabilité typique d'un oscillateur ultra stable à 1 s  $\sim 1 \cdot 10^{-13}$**

# Généralités : Stabilité - bruit

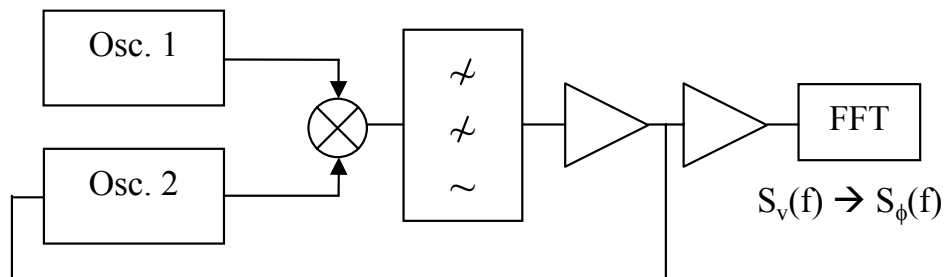
$S_\phi(f)$  préférée si sa mesure est possible car

→ Plus d'informations disponibles

→ Possibilité de remonter à la variance

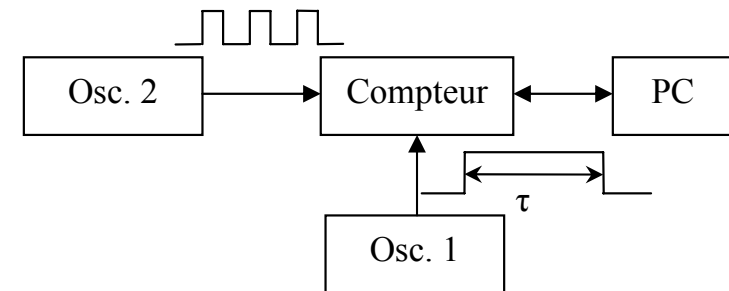
Provenance du bruit	$S_\phi(f)$	$S_y(f)$	$\sigma_y(\tau)$
Marche aléatoire de fréquence	$f^{-4}$	$f^{-2}$	$\tau^{+1/2}$
Bruit flicker de fréquence	$f^{-3}$	$f^{-1}$	$\tau^0$
Bruit blanc de fréquence	$f^{-2}$	$f^0$	$\tau^{-1/2}$
Bruit flicker de phase	$f^{-1}$	$f^{-1}$	$\tau^{-1}$
Bruit blanc de phase	$f^0$	$f^{+2}$	

Nécessité d'asservissement →  
oscillateurs proches en fréquence



Mesure de DSP des fluctuations de phase

Facilité de mesure de variance  
pour des oscillateurs à des  
fréquences différentes



Mesure de variance dans le domaine temporel



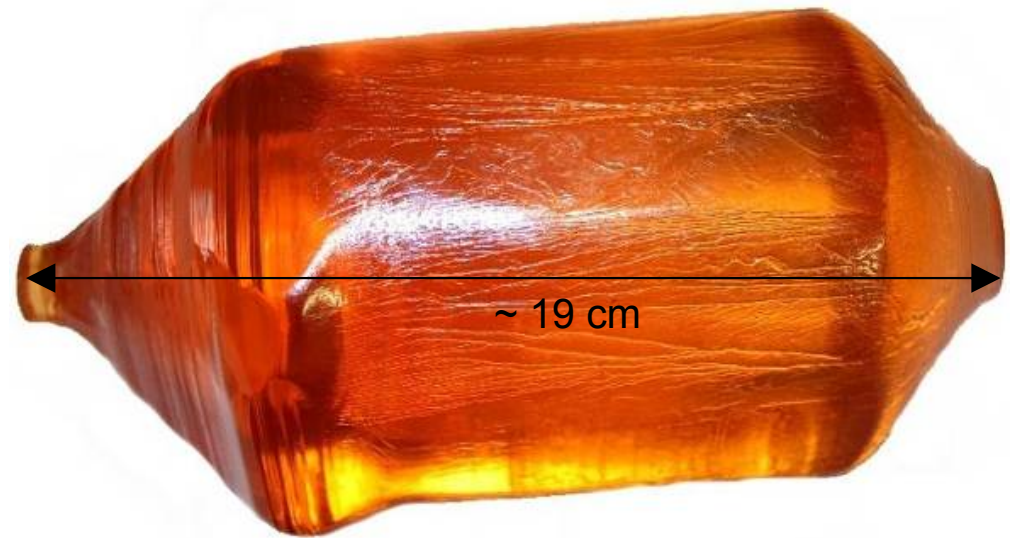
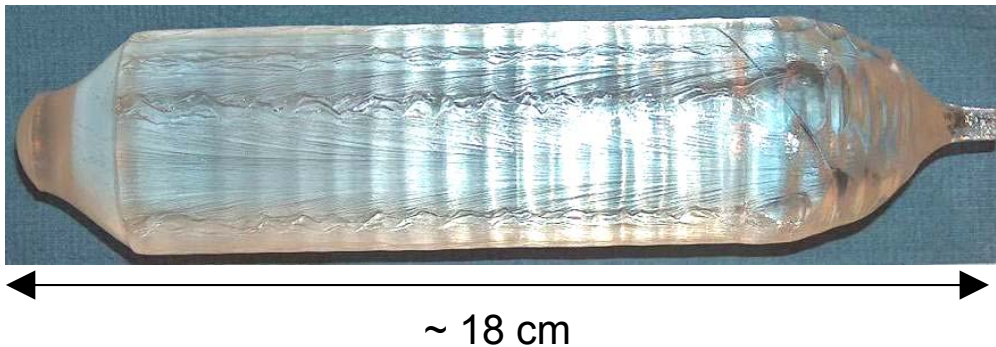


# **Partie 1 : Oscillateur à langatate**

# Oscillateur LGT : Introduction

Volonté d'amélioration des performances par l'essai d'un matériau « nouveau »

- LGS et LGT matériaux de pure synthèse
- Pas de bibliographie à propos de la réalisation et mesures d'oscillateurs
- Résultats existants sur les matériaux et la réalisation de résonateurs

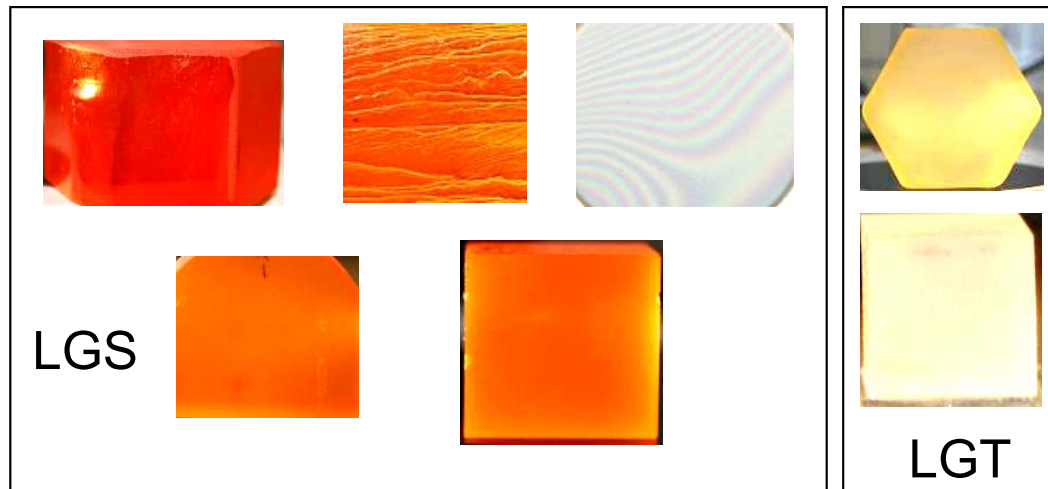


## Objectifs :

- La fabrication de résonateurs à électrodes non-adhérentes à la fréquence de 10MHz
- La réalisation et la caractérisation d'oscillateurs équipés des résonateurs prototypes

# Oscillateur LGT : Fabrication de résonateurs

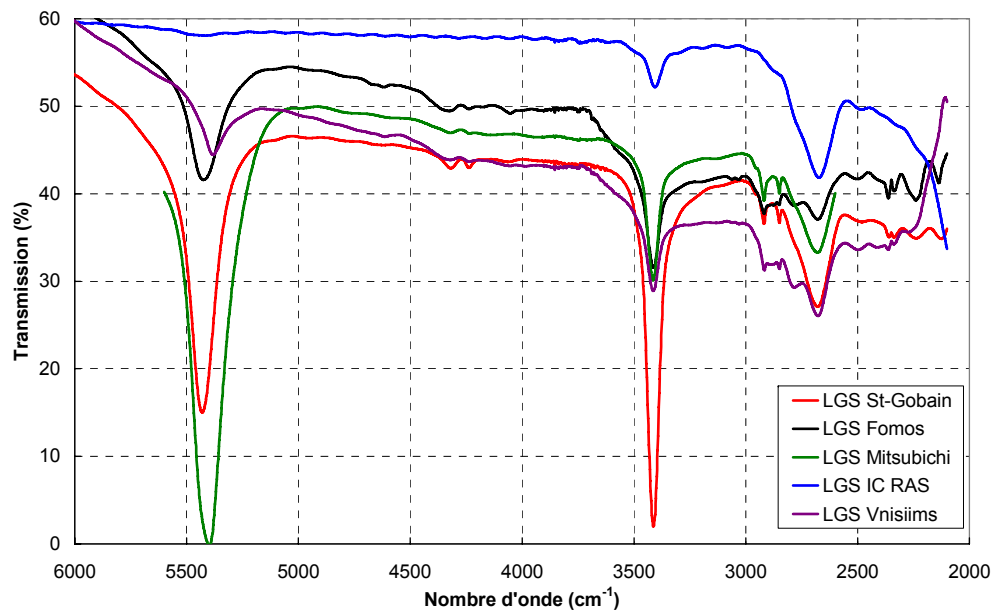
1<sup>ère</sup> étape : mise en évidence de différences de qualité des matériaux



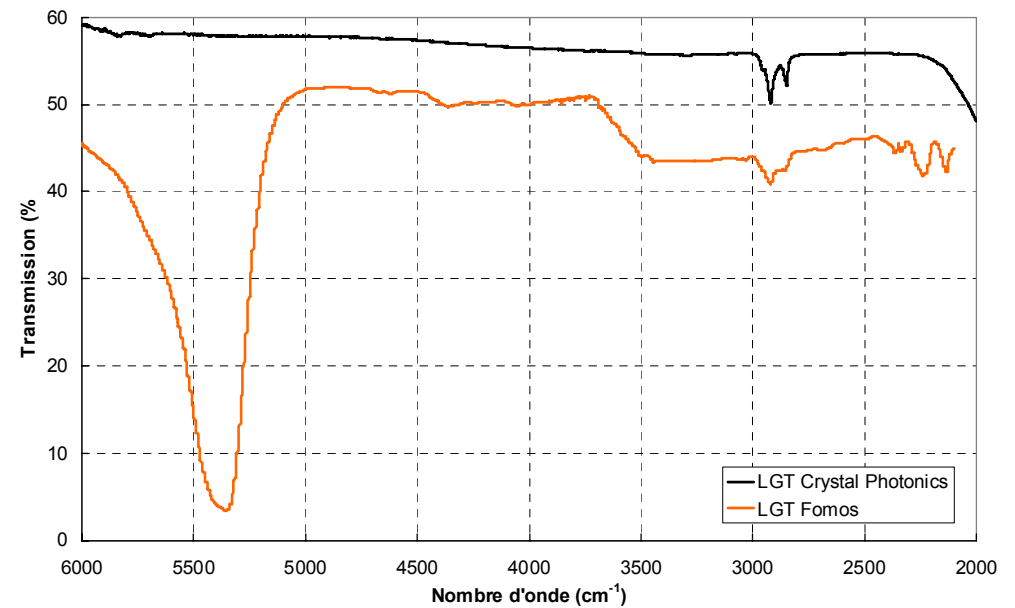
Éléments de sélection :

- La coloration
- Le spectre de transmission infrarouge
- Le coefficient de qualité

→ **Crystal Photonics retenu**



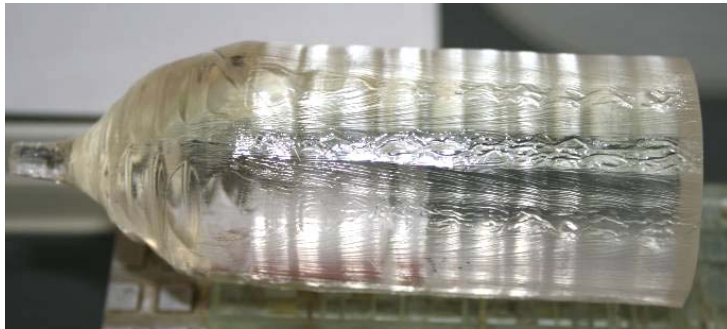
Absorption LGS



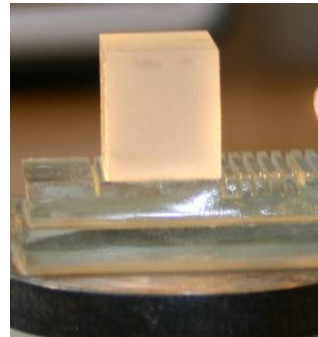
Absorption LGT

# Oscillateur LGT : Fabrication de résonateurs

## Les grandes étapes de fabrication d'un résonateur



Orientation et découpe du barreau dans le cristal



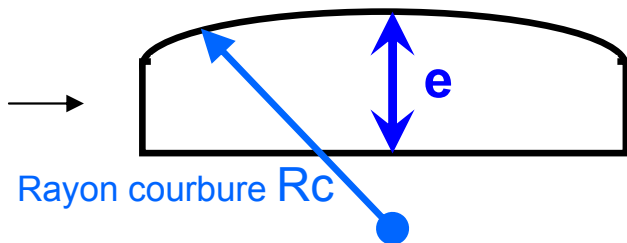
Orientation de l'angle et découpe de la lame dans le barreau



Rectification cylindrique de la lame

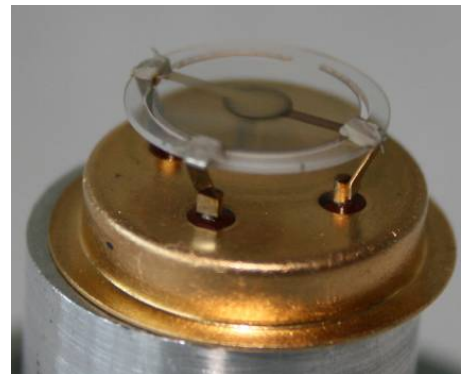


Découpe ultrason des ponts



Rayon courbure RC

Rodage et polissage de la face plane et convexe / mise à l'épaisseur



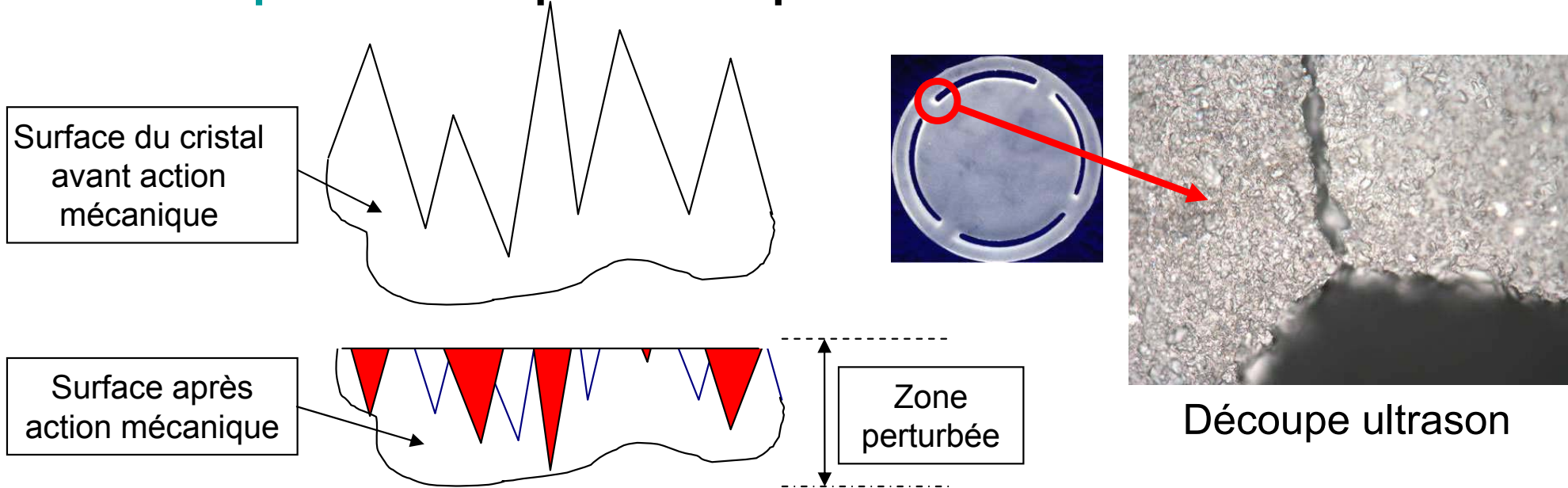
Métallisation et collage du résonateur dans son boîtier



Encapsulation

# Oscillateur LGT : Fabrication de résonateurs

2<sup>ème</sup> étape : mise au point d'un procédé de fabrication de résonateur

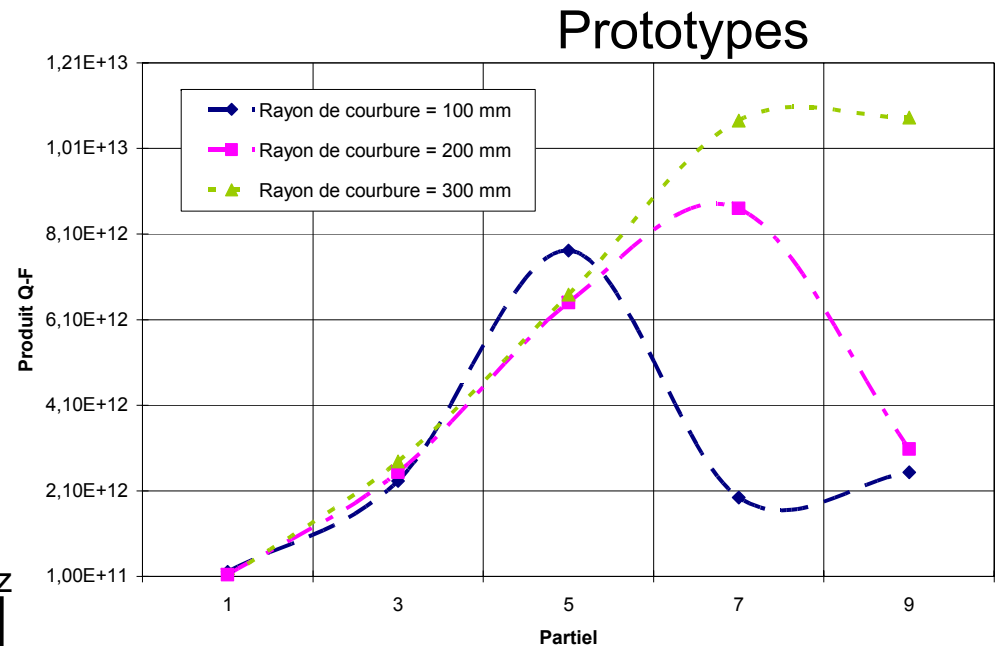
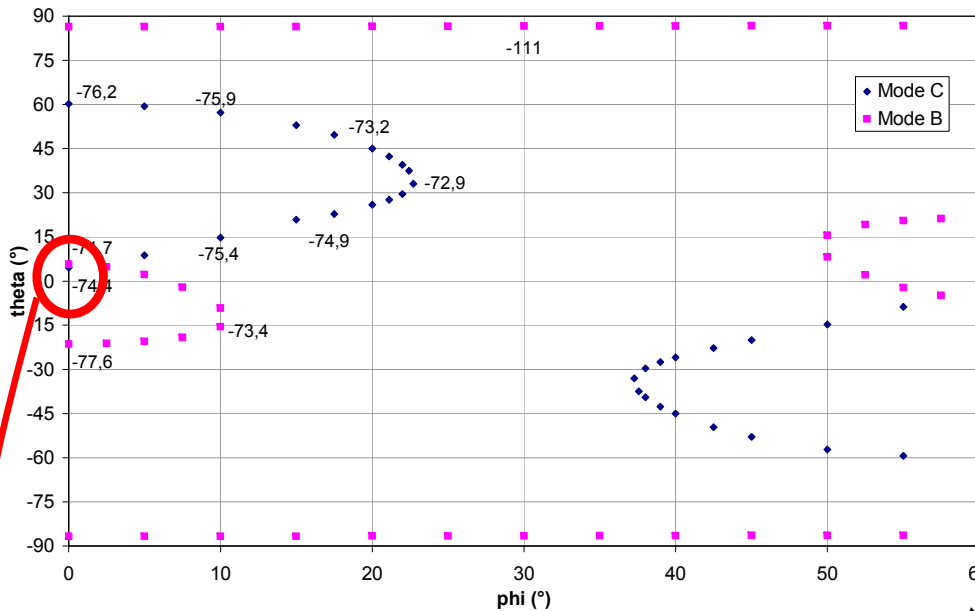
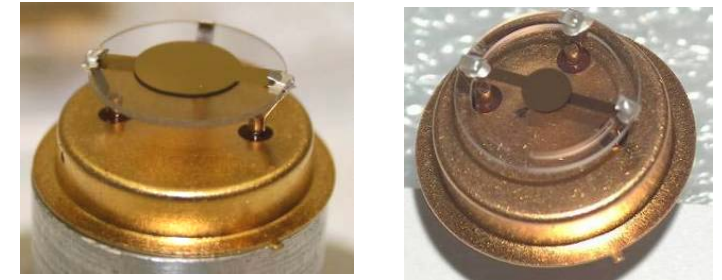


→ Mise au point d'une méthode de fabrication à base de poudre de diamant utilisée sur outillage laiton qui donne un très bon résultat : état de surface (Ra) de l'ordre de 1nm

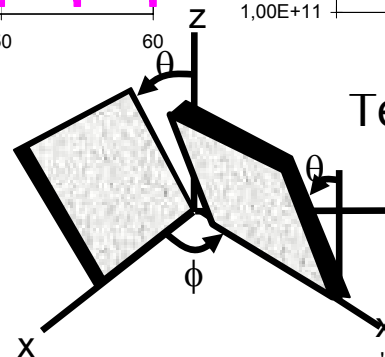
# Oscillateur LGT : Fabrication de résonateurs

## 3<sup>ème</sup> étape : choix d'une géométrie de résonateur et optimisation

- Calcul théorique du piégeage (Tiersten)  $\rightarrow f_{mnp}^2 = f_n^2 \left[ 1 + \frac{1}{n\pi} \sqrt{\frac{2h_0}{R_0}} \left( \sqrt{\frac{M_n}{c}} (2m+1) + \sqrt{\frac{P_n}{c}} (2p+1) \right) \right]$
- Réalisation de prototypes de natures différentes
- Test de plusieurs rayons de courbure



Lieu des coupes compensées en température ( $T^{(1)} f = 0$ ) pour la LGT  
 $\rightarrow$  choix d'une coupe Y simple rotation



Test pour différents rayons de courbure

$\varnothing$  partie active : 10,4 mm

# Oscillateur LGT : Fabrication de résonateurs

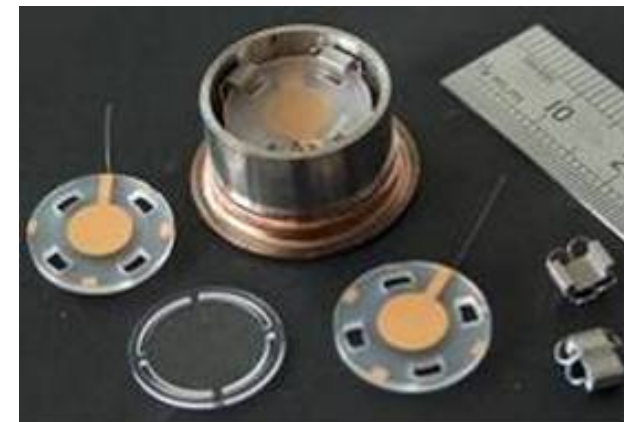
- 10MHz, Mode C, Partiel 5
- Partie active  $\varnothing$  10,4mm, résonateur  $\varnothing$  13,2mm
- Coupe Y-1 car coefficient de couplage élevé et PI  $\sim 80^{\circ}\text{C}$
- Rayon de courbure de 100mm
- Structure BVA (si possible)
- $\varnothing$  d'électrodes de 3,5mm

➔ Avec ces choix :

- Coefficient de qualité  $> 1 \cdot 10^6$
- Capacité parallèle  $\sim 5\text{pF}$
- Point d'inversion  $\sim 80^{\circ}\text{C}$

➔ Ces valeurs sont comparables à celles du résonateur quartz de haute qualité

Structure  
ciblée :  
**B.V.A.**



# Oscillateur LGT : Paramètres des résonateurs

Éléments motionnels typiques pour la topologie choisie (partiel 5) :

$R_x \sim 20 \Omega$

$C_0 \sim 5\text{pF}$

$Q \sim 1,4 \cdot 10^6 @ 10 \text{ MHz}$

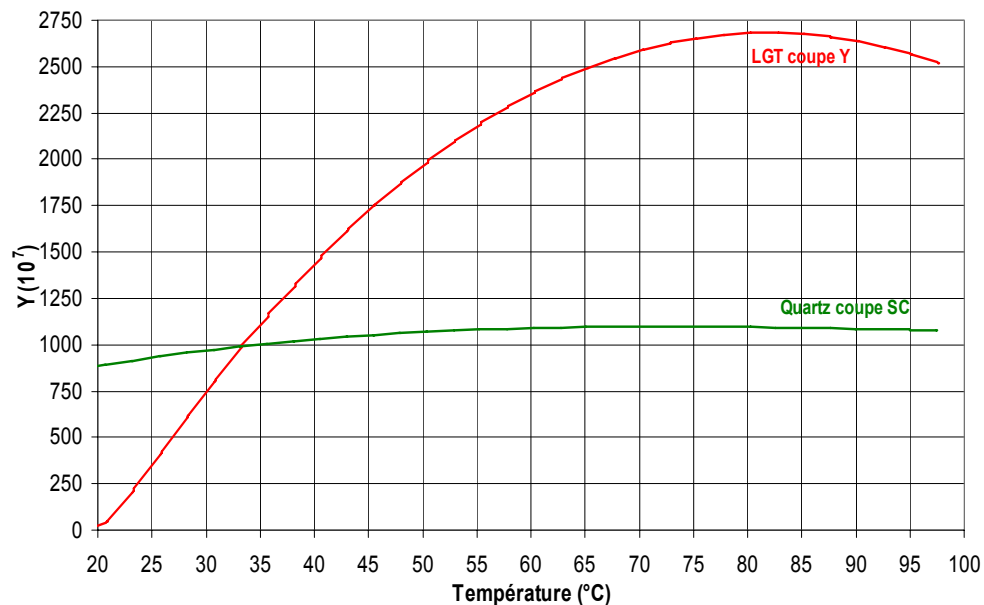
Résistances motionnelles du P3 et P1 inférieures ou égales à celle du P5

+ + + LGT 2 à 3 fois moins sensible / quartz à la puissance d'excitation

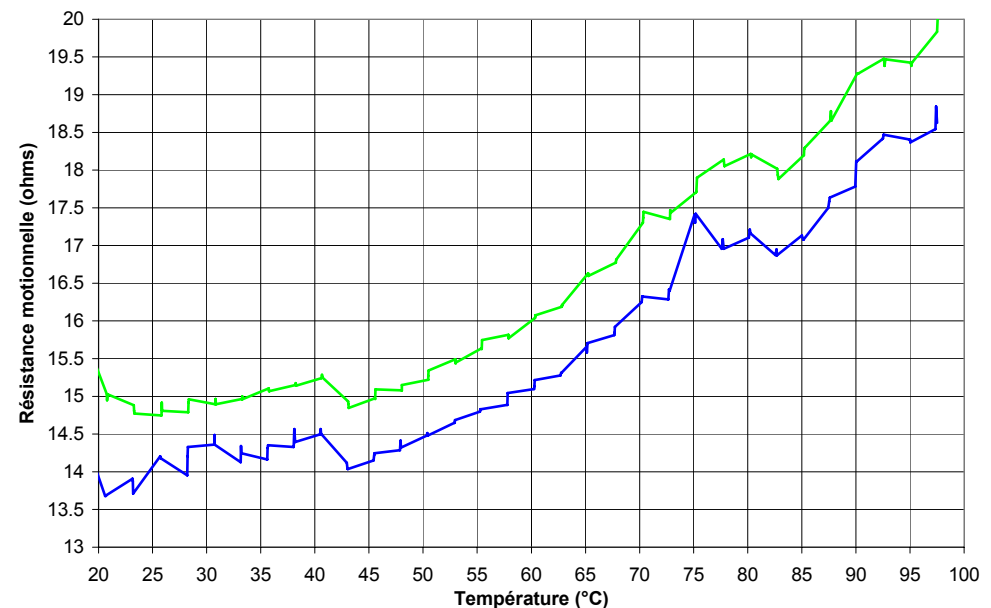
- - - LGT 10 fois plus sensible à la température / quartz

Pour la coupe Y :  $P_i \sim 63^\circ\text{C}$  et  $\Delta f \sim 1350 \text{ Hz}$

Pour la coupe Y-1 :  $P_i \sim 83^\circ\text{C}$  et  $\Delta f \sim 2500 \text{ Hz}$



Comparaison courbes F-T résonateurs LGT coupe Y et Quartz coupe SC



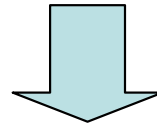
Variation de la résistance motionnelle en fonction de T pour deux résonateurs LGT coupe Y



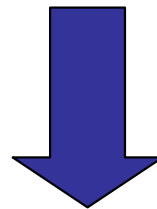
# Oscillateur LGT : Mise au point de l'oscillateur

L'oscillateur doit permettre :

- D'obtenir un  $Q$  en charge élevé malgré la faible valeur  $R_x$
- La sélection du partiel 5 (résistance motionnelle plus forte que P3 et P1)
- De maîtriser la puissance d'excitation du résonateur



Différentes structures testées expérimentalement

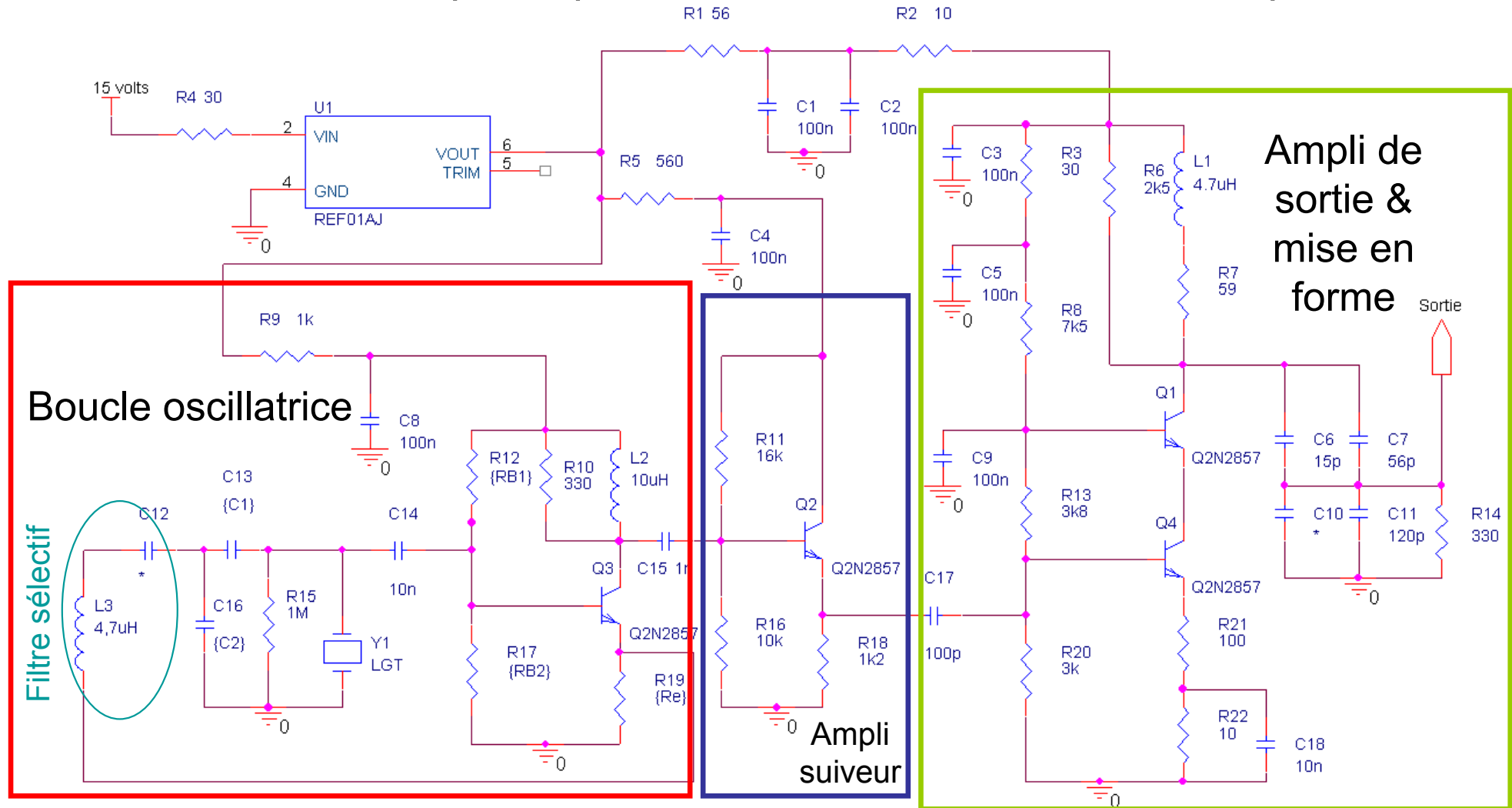


Une topologie retenue pour la boucle oscillatrice

# Oscillateur LGT : Mise au point de l'oscillateur

## L'oscillateur de type Colpitts

➔ Boucle simple et performante en termes de bruit de phase



Oscillateur complet

# Oscillateur LGT : Mise au point de l'oscillateur

## Méthode d'optimisation « automatisée » sur PSPICE Optimizer :

Les paramètres ciblés sont :

- Q en charge > 60 % du Q à vide
- gain boucle ouverte > 1,2 pour le partiel 5
- gain boucle ouverte < 0,9 pour le partiel 3
- puissance d'excitation ~ 50 μW

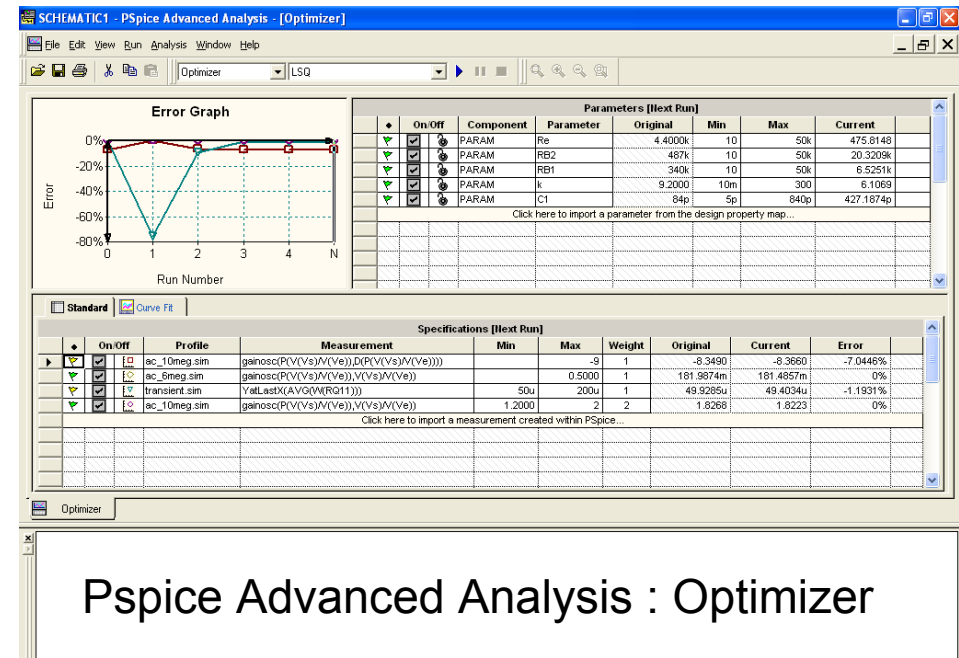
$$\left. \frac{d\varphi}{df} \right|_{f_{osc}} = 2 \frac{Q_L}{f_{osc}} rd.Hz^{-1}$$

Simulation en boucle ouverte  
répétée trois fois

Simulation en boucle fermée  
avec un Q réduit

## Méthode satisfaisante :

- o Optimisation pertinente
- o Polarisation et formes de signaux conformes à l'expérimental
- o Exécution en temps masqué



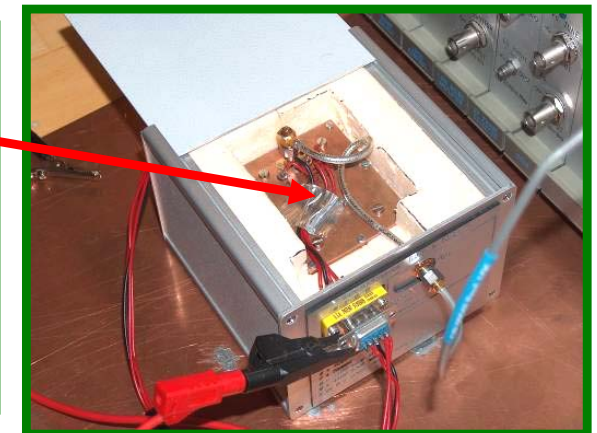
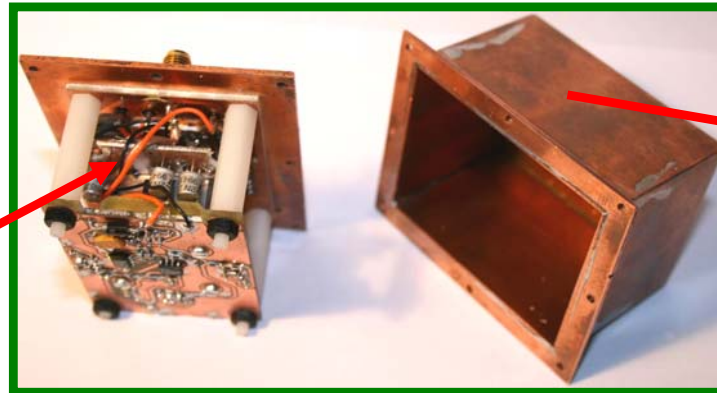
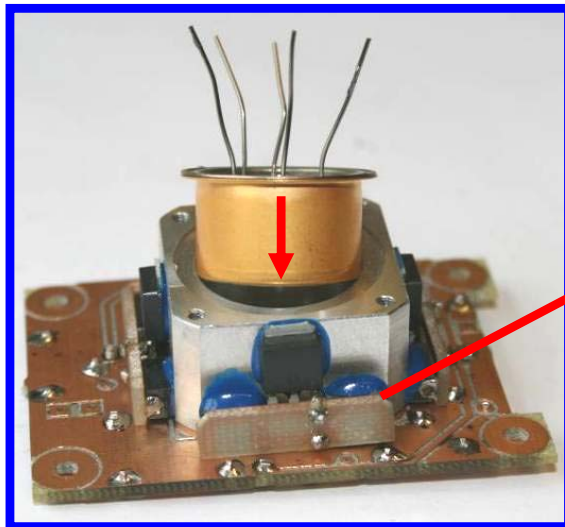
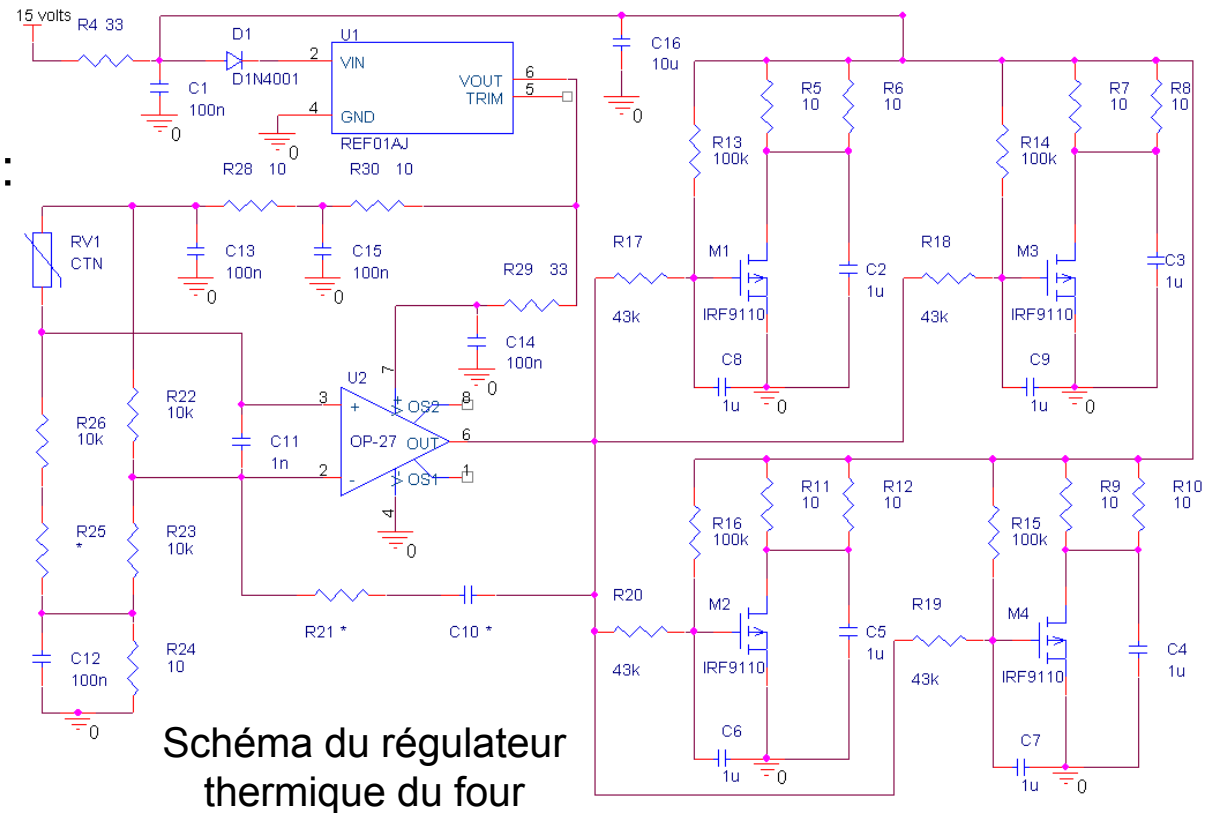
Pspice Advanced Analysis : Optimizer

# Oscillateur LGT : Mise au point de l'oscillateur

## Aspects thermiques :

Mise au point d'un double thermostat :

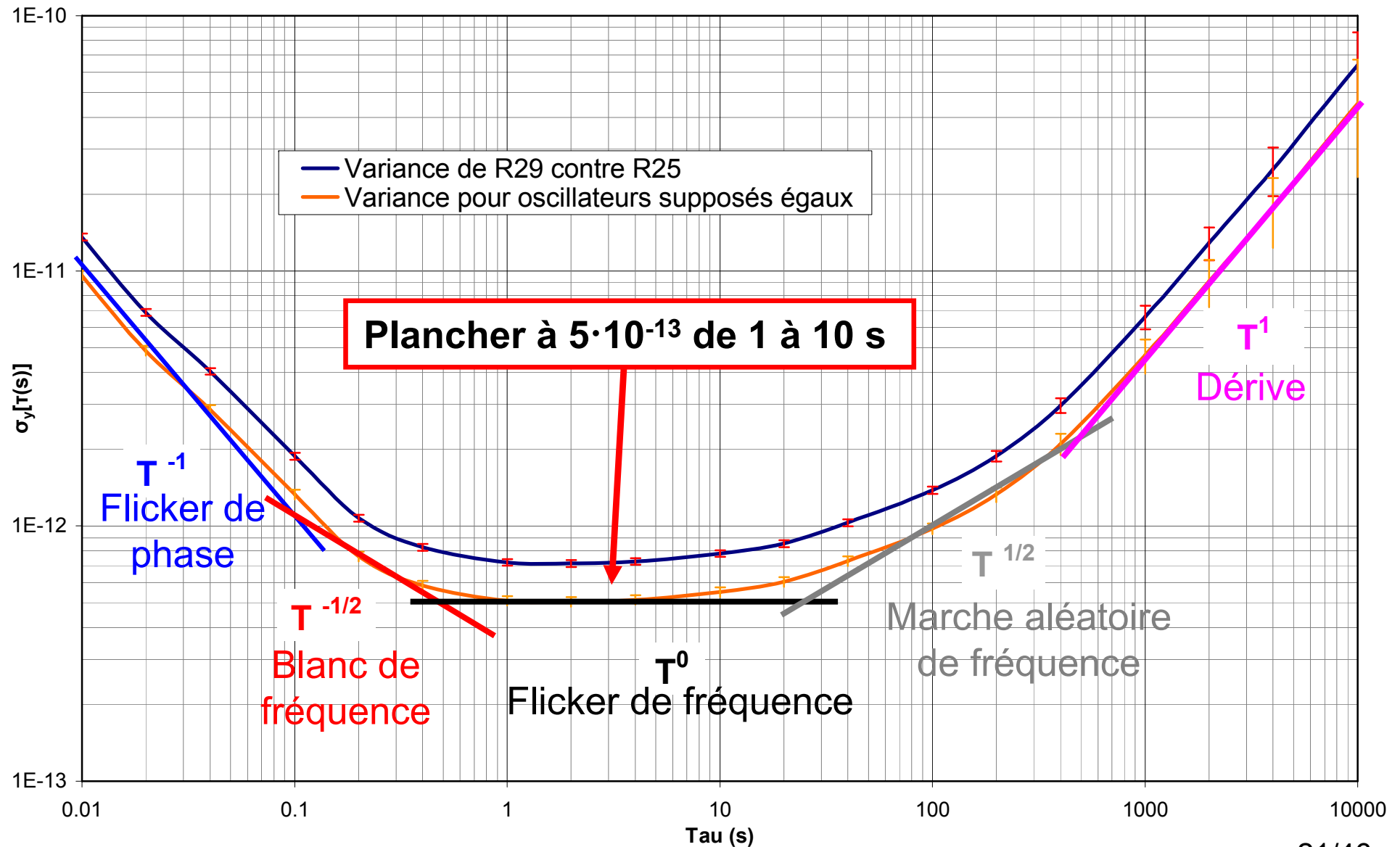
- Structure à 4 éléments chauffants pour le cœur
  - Structure cuivre thermostatée par deux éléments chauffants et insérée dans une mousse isolante
- Diminution du gradient de temp.
- $320 < \text{gain thermique} < 350$



# Oscillateur LGT : Mesure de bruit et analyse

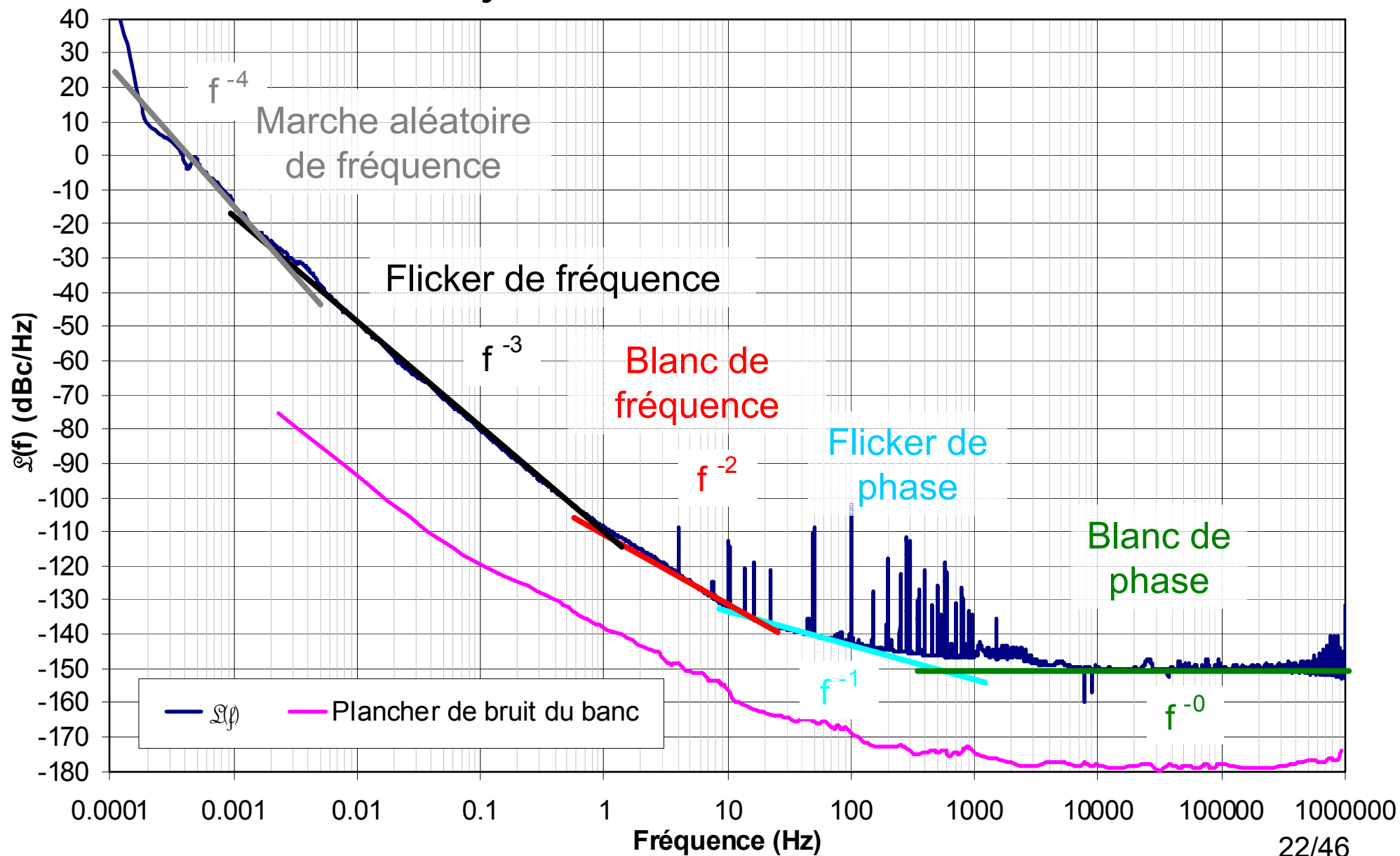
Fréquences des oscillateurs différentes et éloignées de 10 MHz :

→ Caractérisation temporelle en termes d'écart types (variance d'Allan)



# Oscillateur LGT : Mesure de bruit et analyse

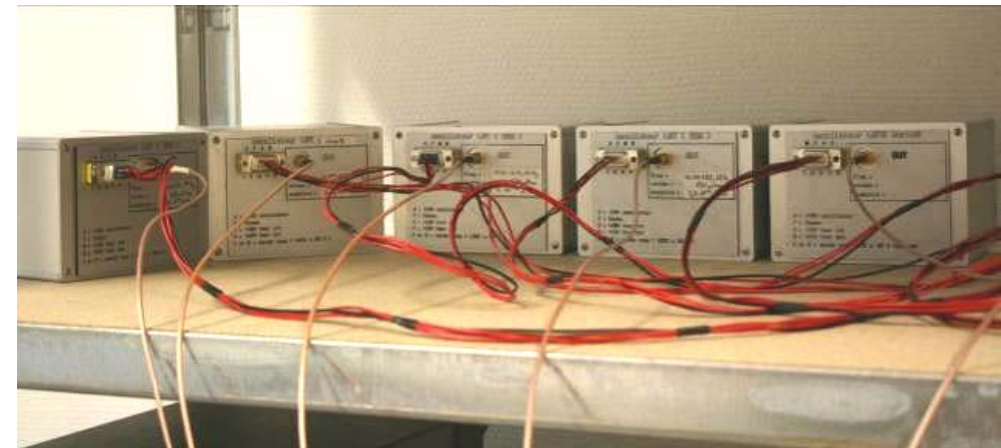
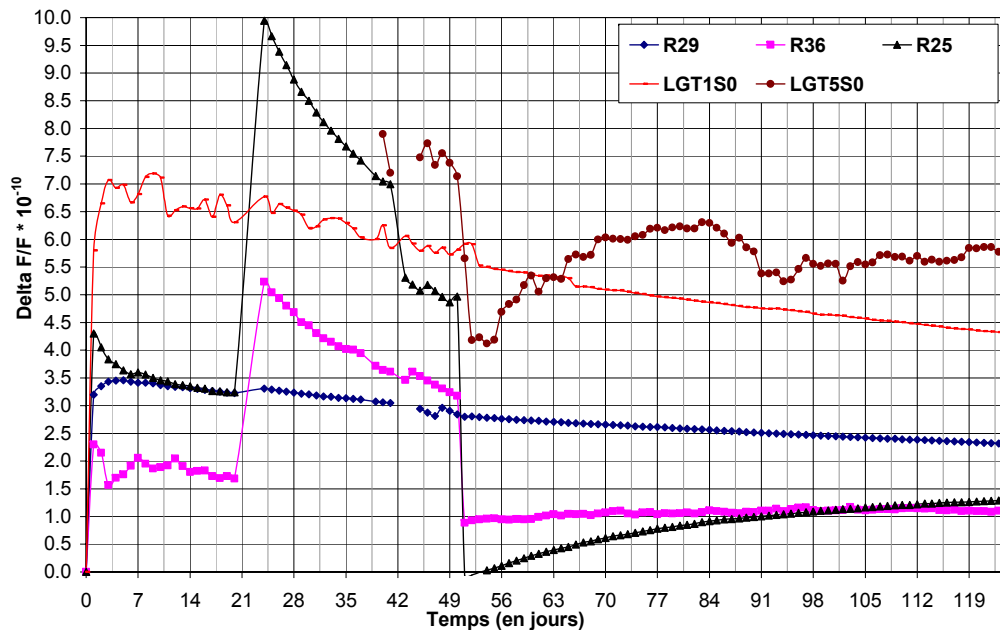
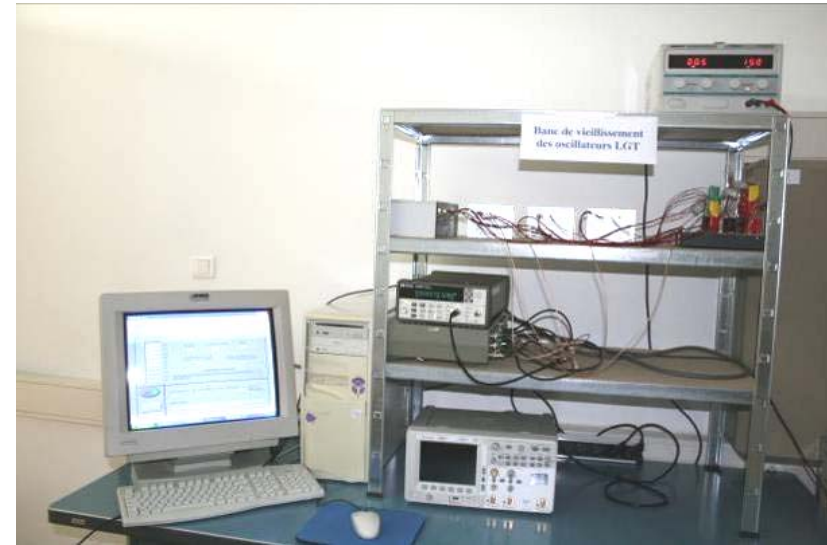
Opportunité de mesure de DSP des fluctuations de phase avec l'appareil *Symmetricom TSC5120A*



# Oscillateur LGT : Mesure de bruit et analyse

## Mesure de vieillissement :

- Création d'un banc de mesure spécifique
- Très chahutée pour des résonateurs neufs
- Nette amélioration au delà de 60 jours
- Pas de recuit...
- Pour l'instant vieillissement de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-10}$  par jour



R29	R36	R25	LGT1S0	LGT5S0
$3,2 \cdot 10^{-10}$ / jour	$1,7 \cdot 10^{-10}$ / jour	$3,2 \cdot 10^{-10}$ / jour	$6,3 \cdot 10^{-10}$ / jour	$5,5 \cdot 10^{-10}$ / jour

# Oscillateur LGT : Conclusion

Perspectives très bonnes pour le cristal de LGT :

Il peut remplacer le cristal de quartz dans les applications ultra-stables !!!

A ce stade de l'étude il reste encore du travail :

- ❖ Approvisionnement de qualité garantie
- ❖ La géométrie des résonateurs à revoir
  - ❖ La sensibilité thermique
  - ❖ Un gabarit de recuit
  - ❖ Bruit propre ?





# **Partie 2 : Oscillateur cryogénique**

# Oscillateur Cryo. : Introduction

Diminution des pertes acoustiques  
proportionnelles à  $T^4$  :

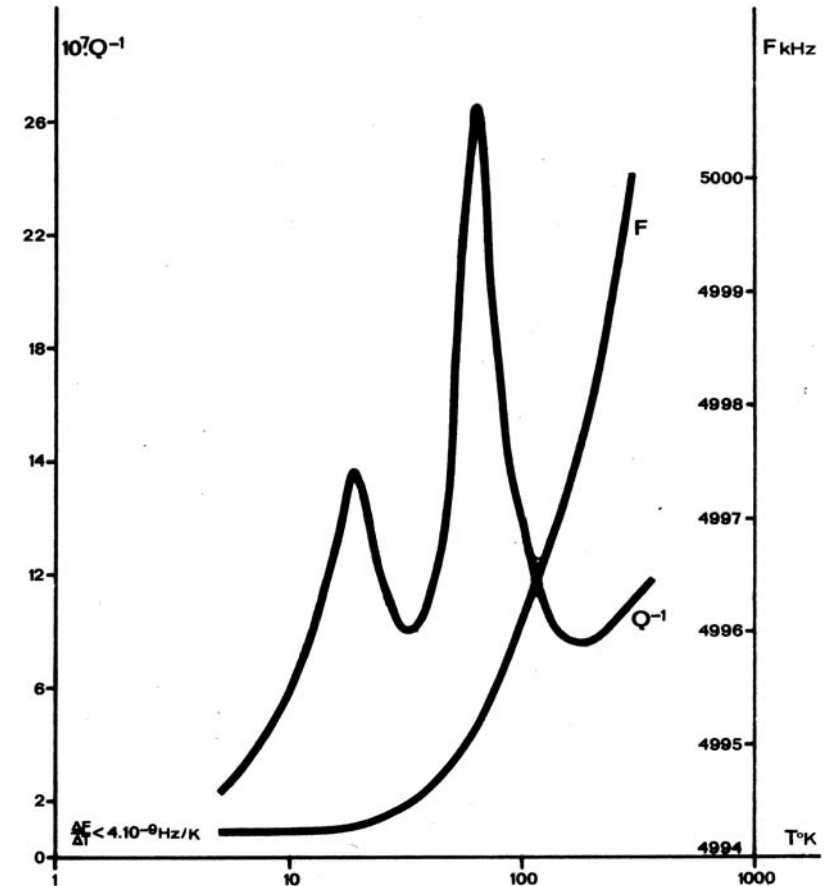
- Augmentation du Q aux températures  $< 10$  K
  - Relation entre Q et bruit vérifiée en pratique
- Donc diminution potentielle du bruit

Amélioration des techniques de cryo. :

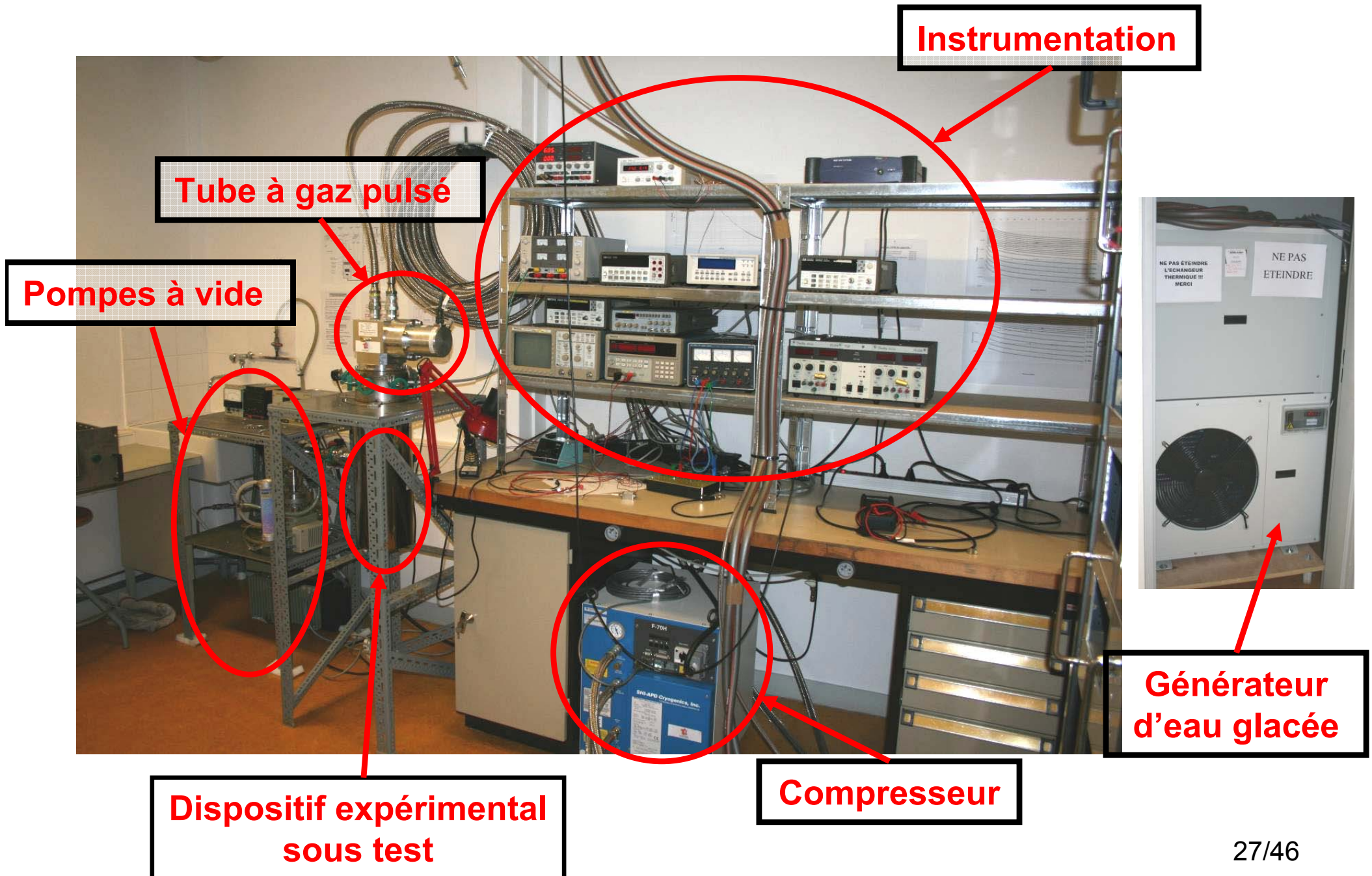
- Durée d'utilisation longue
  - Températures  $< \text{He}$  liquide
- Mise en place relativement simple

Bibliographie existante :

- Mesures de Q à basse température ( $45 \cdot 10^6 \times 10$  MHz)
- Variance pour une excitation passive mais pas d'info sur la puissance (qq  $10^{-13}$ )
- Réalisation d'oscillateurs mais pas de variance



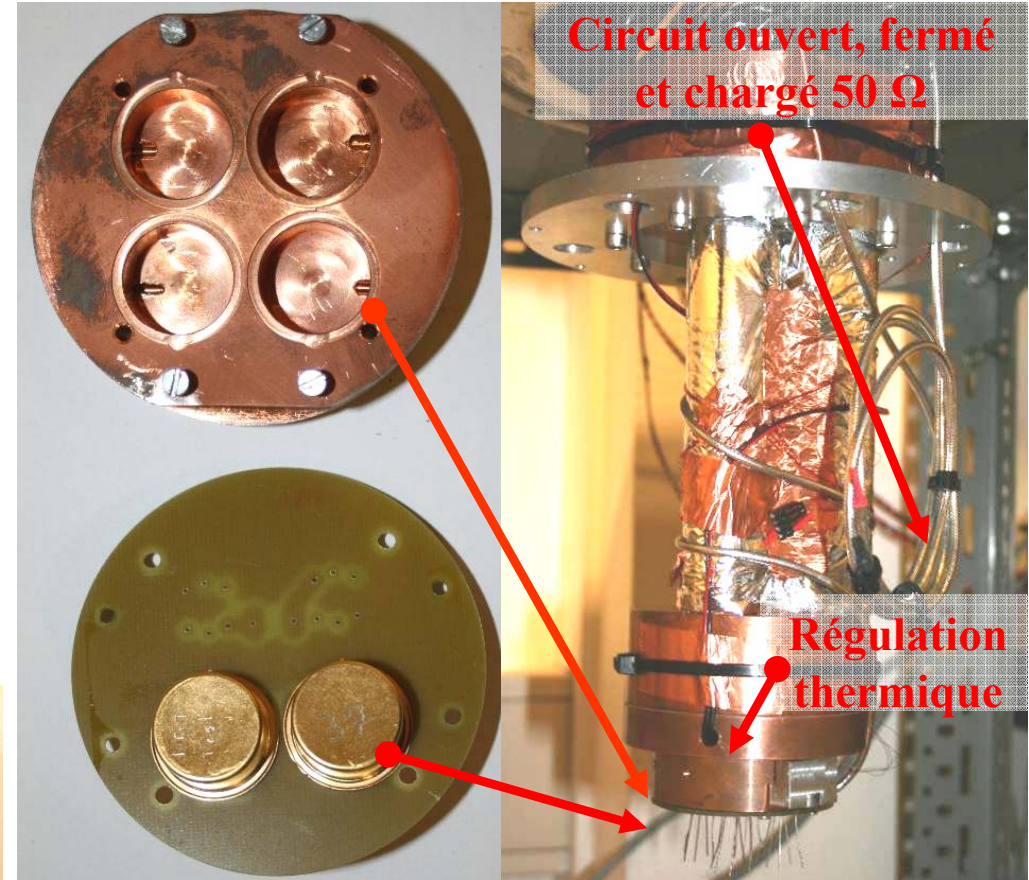
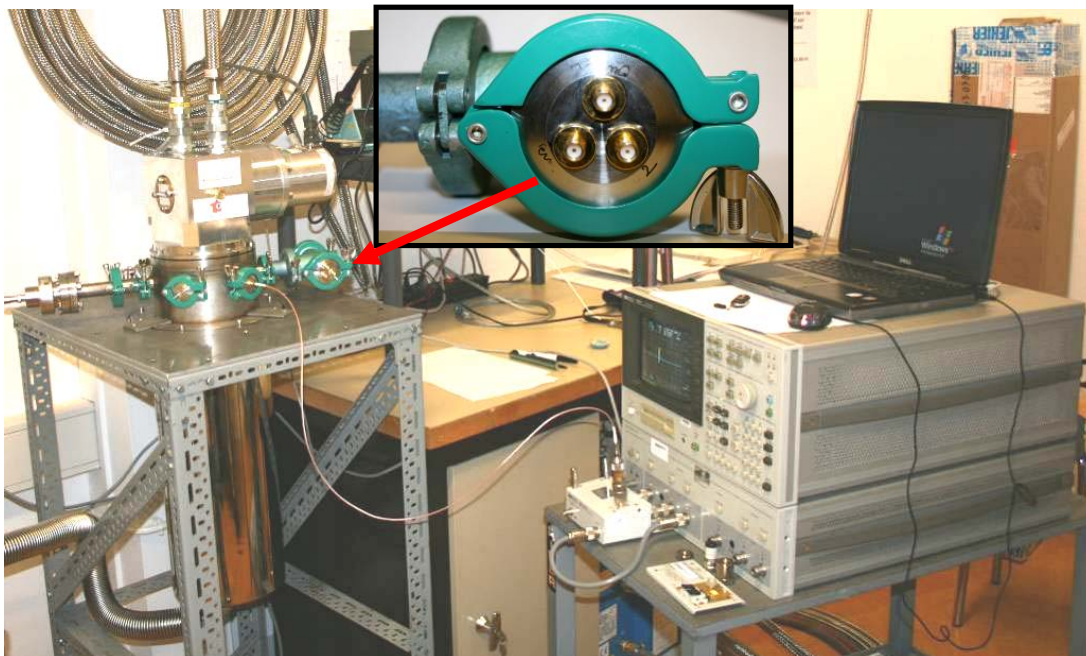
# Oscillateur Cryo. : Présentation de l'ensemble expérimentale



# Oscillateur cryo. : Mesure de résonateurs

## Méthode de mesure :

- Analyseur de réseaux + kit impédance
- Compensation en bout de câbles par étalonnage sur circuit ouvert, fermé et chargé  $50 \Omega$
- Réduction des pertes thermiques pour atteindre T mini
- Possibilité de réguler la température



Circuit ouvert, fermé  
et chargé  $50 \Omega$

Régulation  
thermique

## Limites de mesures :

- Résolution de 1 mHz
- Puissance mini de 50 dBm
- Température mini de 3,3 K

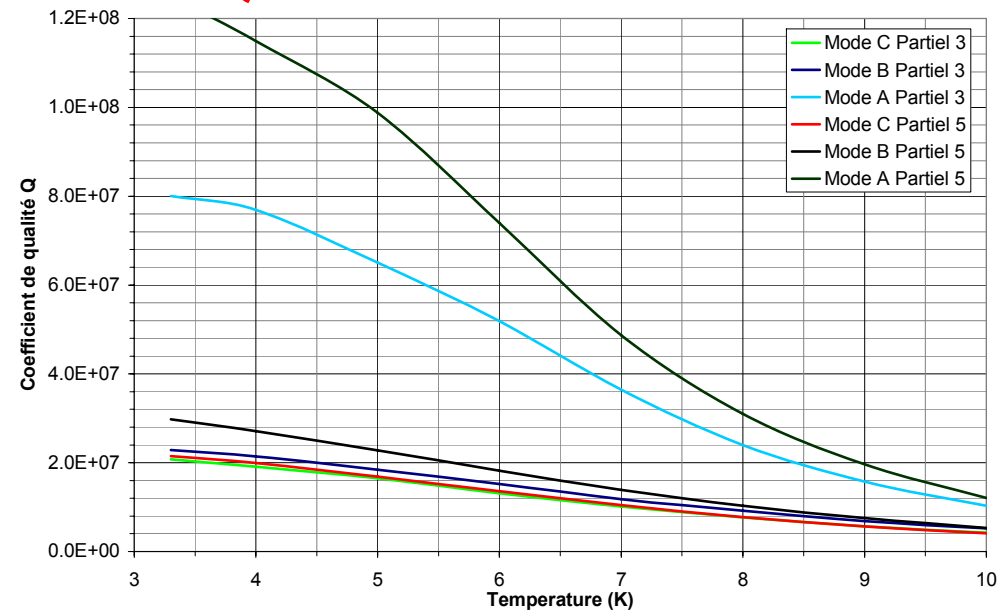
# Oscillateur cryo. : Mesure de résonateurs

## Résonateurs quartz de coupe SC

(Double rotation / repère cristallin)

- Meilleur Q sur le partiel 5 du Mode A à une fréquence de 31,2 MHz
- Sensibilité thermique de qq  $10^{-9} \text{ K}^{-1}$
- Sensibilité à P excitation  $\sim 1,5 \cdot 10^{-8} \mu\text{W}^{-1}$

## Q record de 125 millions

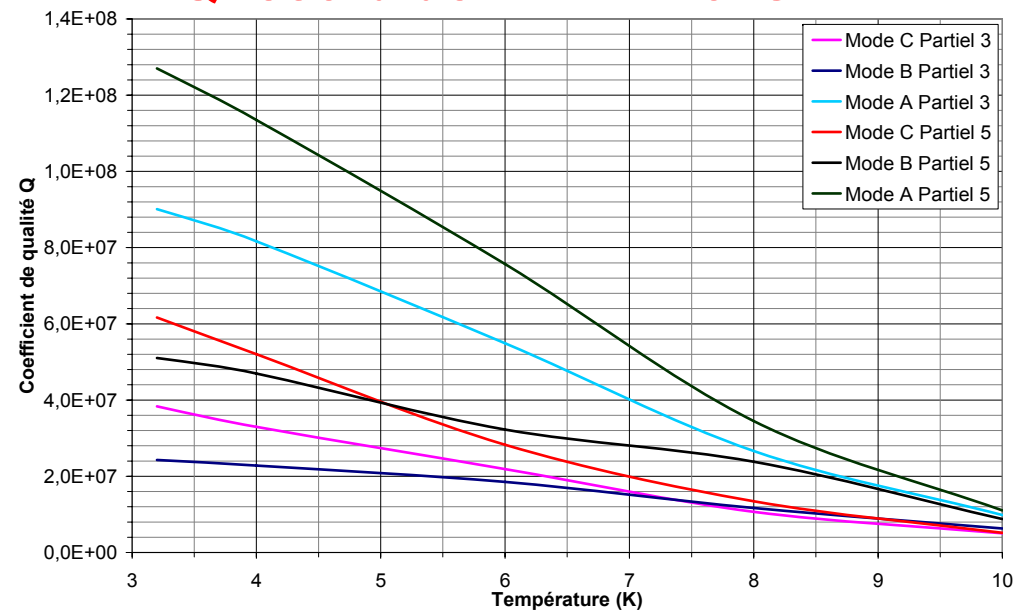


## Résonateurs quartz de coupe LD

(Double rotation / repère cristallin)

- Meilleur Q sur le partiel 5 du Mode A à la fréquence de 29,8 MHz
- Sensibilité thermique de qq  $10^{-8} \text{ K}^{-1}$
- Sensibilité à P excitation  $\sim 1 \cdot 10^{-10} \mu\text{W}^{-1}$

## Q record de 127 millions



# Oscillateur cryo. : Mesure de résonateurs

- La coupe SC a la plus faible sensibilité à la température
- La coupe LD a la plus faible sensibilité à la puissance d'excitation
- Les deux coupes ont des performances similaires en termes de Q

La coupe SC est 10 fois plus sensible à P excitation / T ambiante : nécessité de faire travailler le résonateur à une puissance plus faible

La sensibilité thermique impose la mise en place d'un système de régulation stable

Observation de l'ordre décroissant des coefficients de qualité :

A P5 → A P3 → B P5 → C P5 → B P3 → C P3

- Lié à l'ordre des piégeages calculés d'après le modèle de Stevens et Tiersten :

A P5 → A P3 → B P5 → C P5 → B P3 → C P3

- Limitations de Q induites par des pertes dans les fixations :

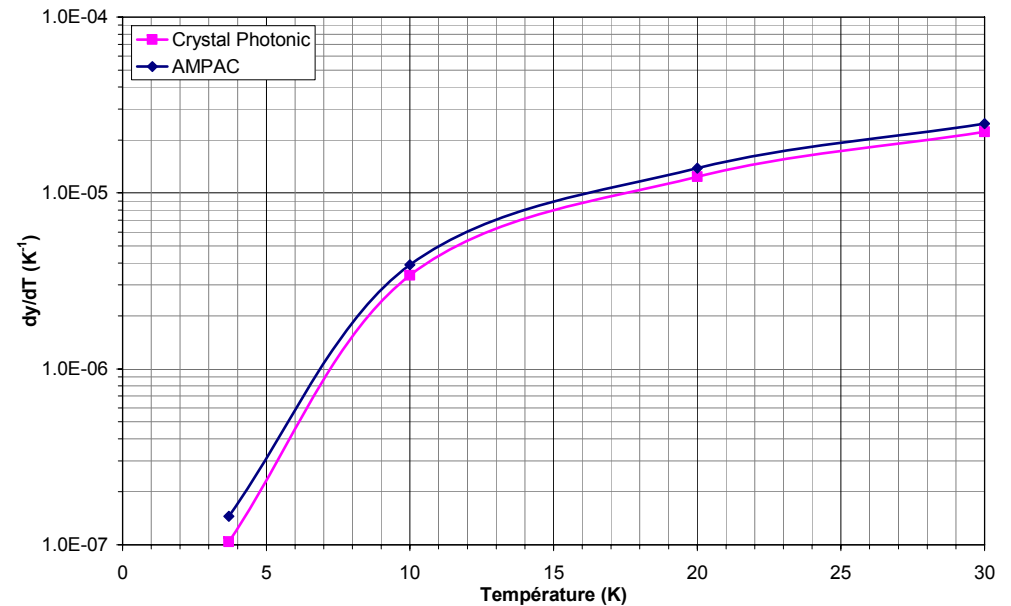
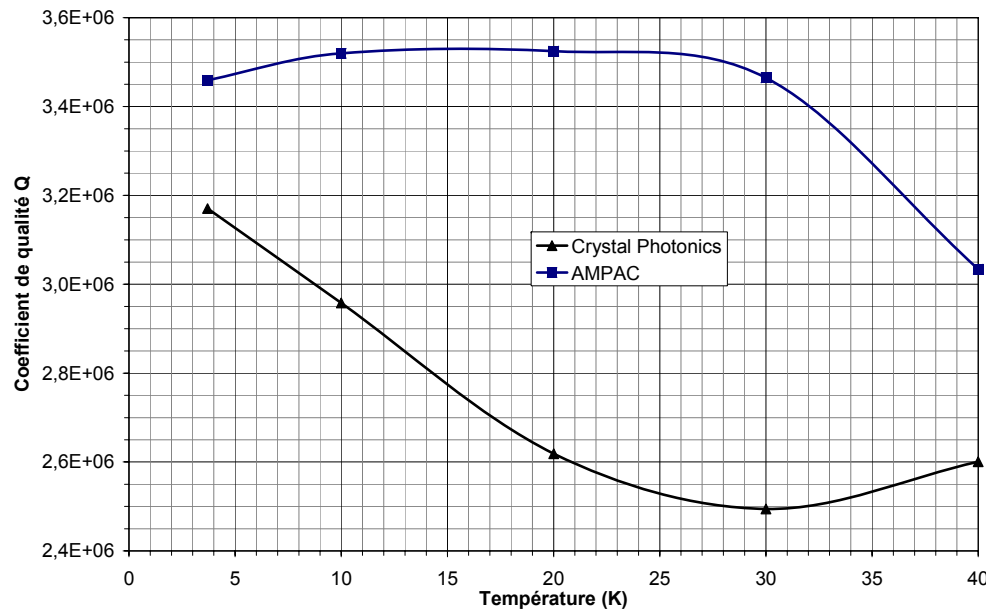
**Il est possible d'améliorer encore le Q à basse température !!!**

# Oscillateur cryo. : Mesure de résonateurs

## Résonateurs LGT de coupe Y

- Gain de 5 sur le Q
  - Sensibilité thermique réduite
  - Origine du matériau influente
  - Pas de pic d'absorption (Biblio.)
- ➔ Présente un intérêt si la température à atteindre est moins faible que pour le quartz, à suivre suivant l'évolution de la LGT...

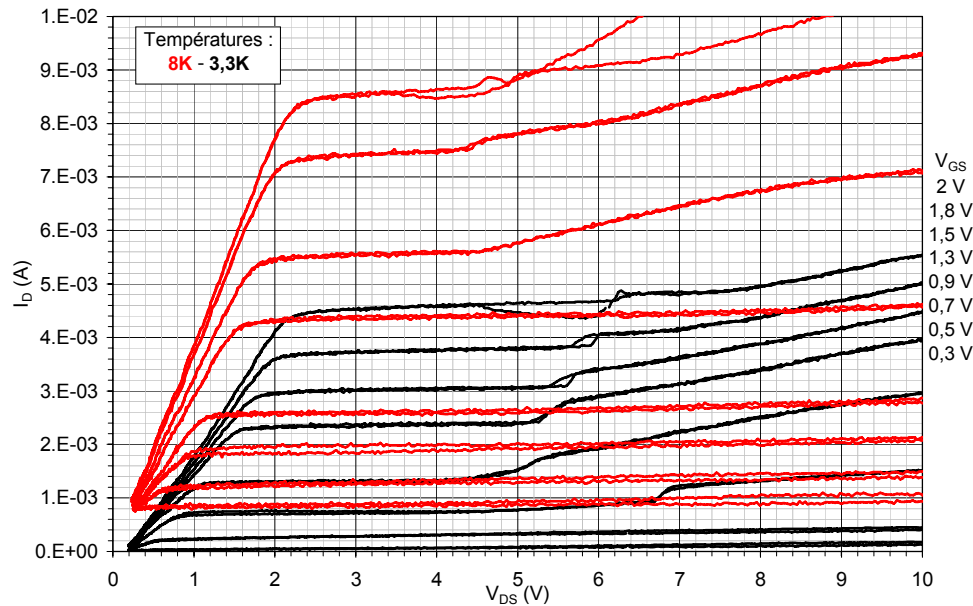
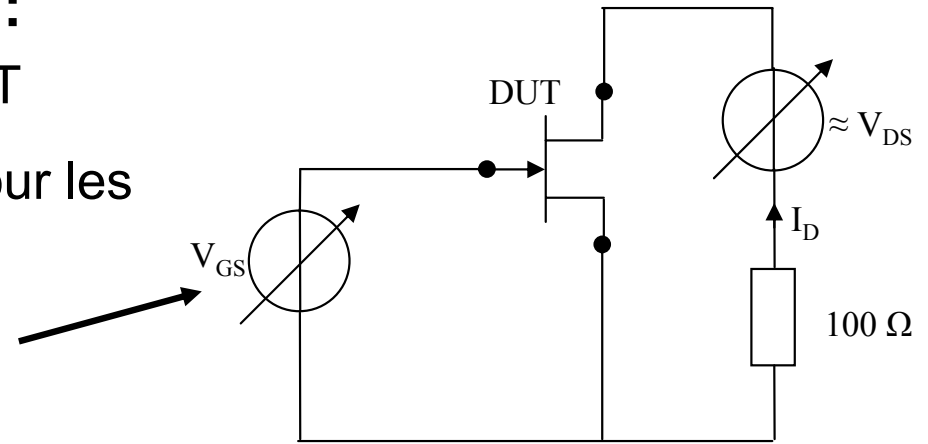
à 295 K	Rx ( $\Omega$ )	Fréquence (Hz)	Q ( $10^6$ )
Crystal Photonic	20,9	10219900	0,58
AMPAC	12,4	10783135	0,8
à 3,7 K	Rx ( $\Omega$ )	Fréquence (Hz)	Q ( $10^6$ )
Crystal Photonic	4	10143073	3,2
AMPAC	3,6	10692841	3,5
<b>Rapport moyen</b>	<b>4,4</b>	<b><math>\Delta = 83560</math></b>	<b>4,9</b>



# Oscillateur cryo. : Mesure et modélisation de transistors

## Mesure :

- 2 types de transistors testés : JFET et MOSFET
- Plusieurs références testées : BF988 retenu pour les mesures et la modélisation
- Mesure effectuée à l'aide d'un montage simple



De gros écarts de caractéristiques :

- D'un transistor à l'autre
- À deux températures différentes

	$V_{T0}$ (V)	$I_{DSS}$ (mA)
Données constructeur à 290 K	-2,5 min.	4 à 18
Mesuré à 3,3 K	~ 0,025	0

Le transistor passe du comportement en appauvrissement à celui en enrichissement

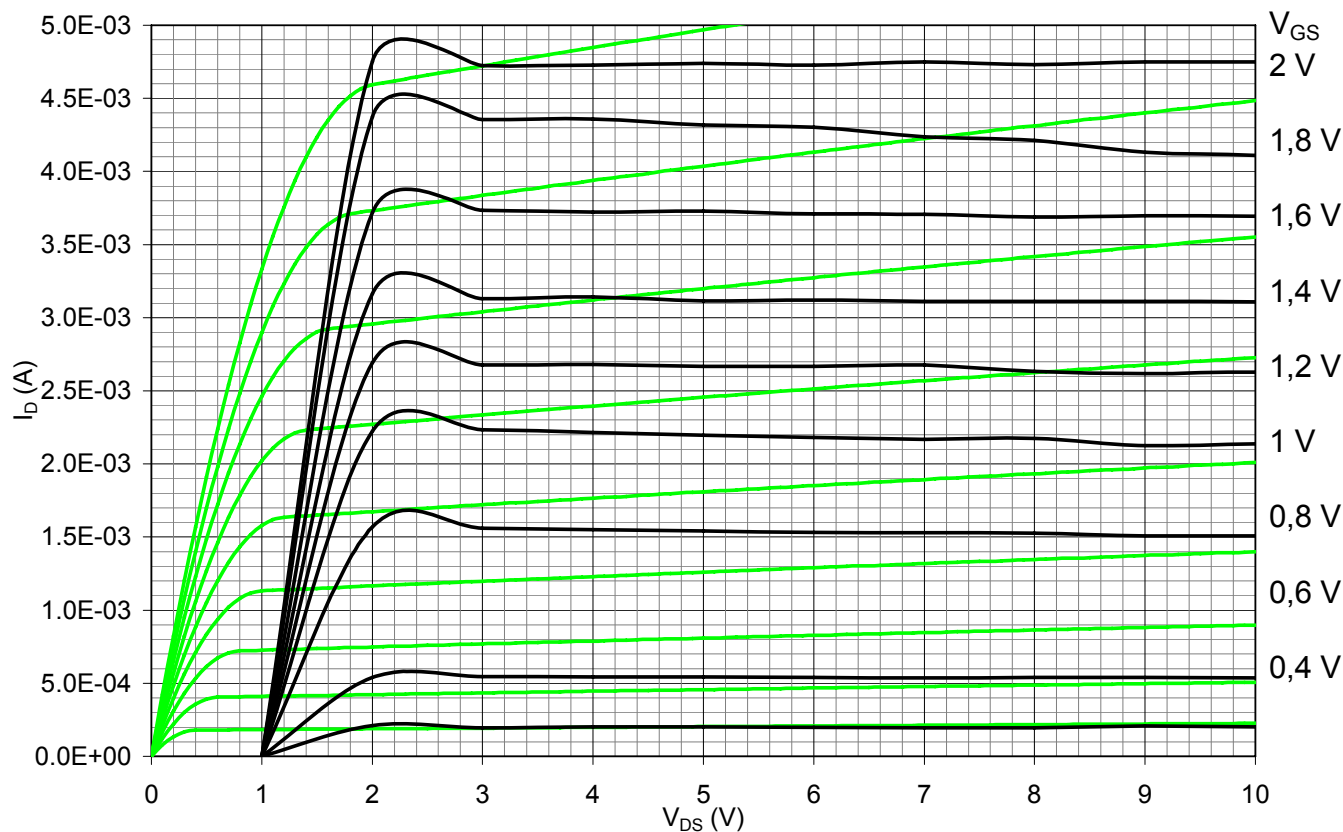


## Modélisation :

Le but est la prévision du fonctionnement pas la modélisation exacte :

- Utilisation d'un modèle PSPICE de niveau 1 (le plus simple)
- Modèle basé sur celui du BF998 (version protégée du BF988)

➔ Le modèle est ajusté à la caractéristique mesurée



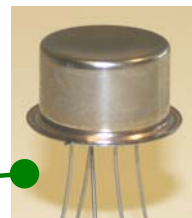
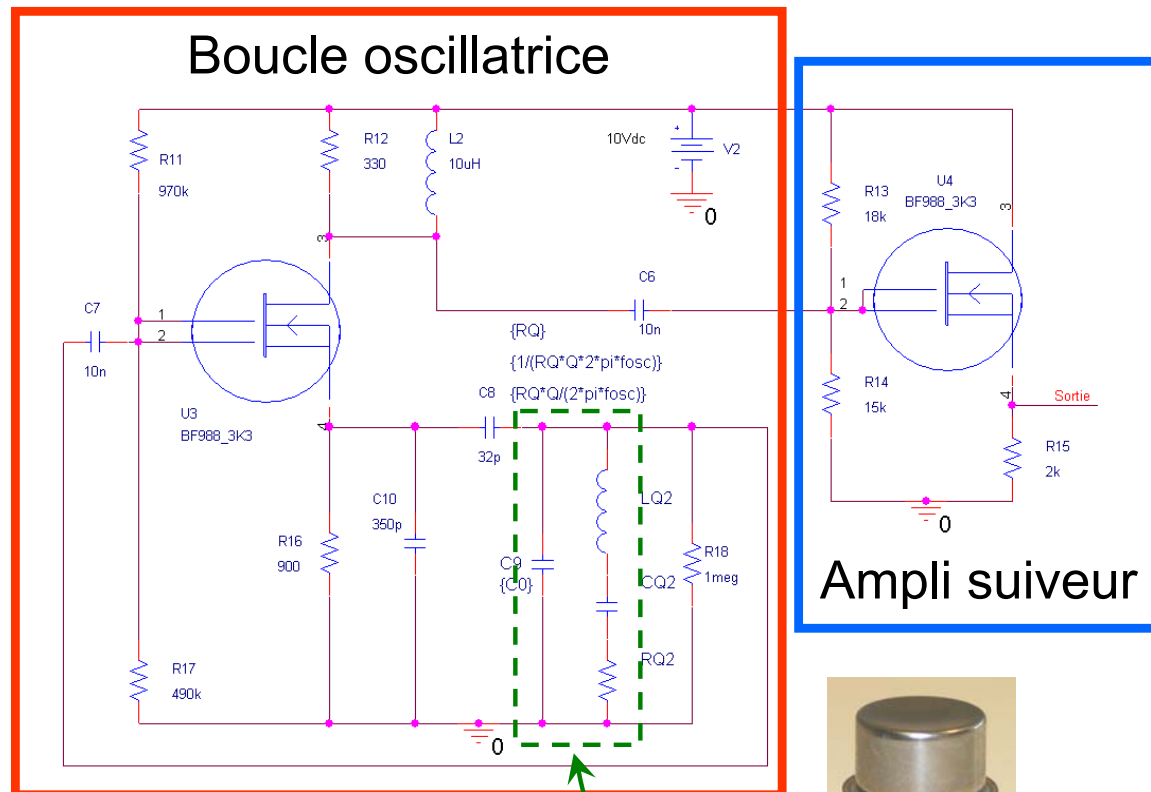
Comparaison du modèle PSPICE en vert la avec la mesure effectuée sur le BF988 #4 en noir.

# Oscillateur cryo. : Mise au point de l'oscillateur

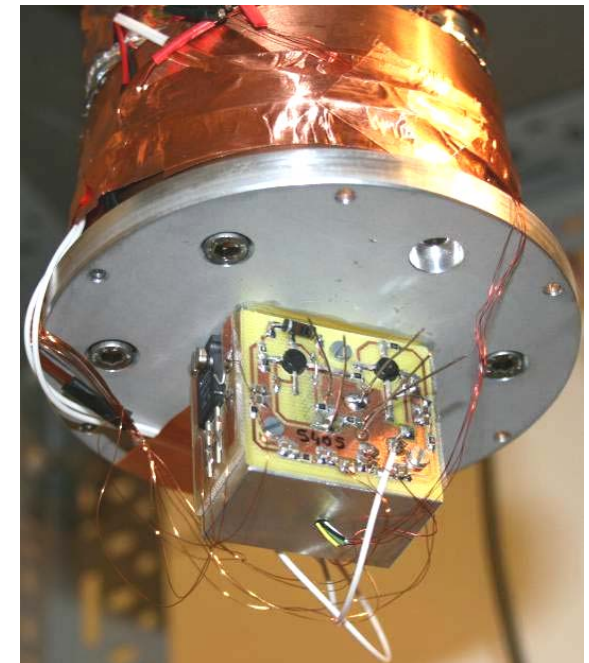
## Premiers oscillateurs testés :

- Topologie Colpitts retenu
- Utilisation impossible d'un filtre de sélection
- Grilles du transistor connectées

➔ Les oscillateurs fonctionnent en simulation mais ne démarrent pas à basse température : **ECHEC**



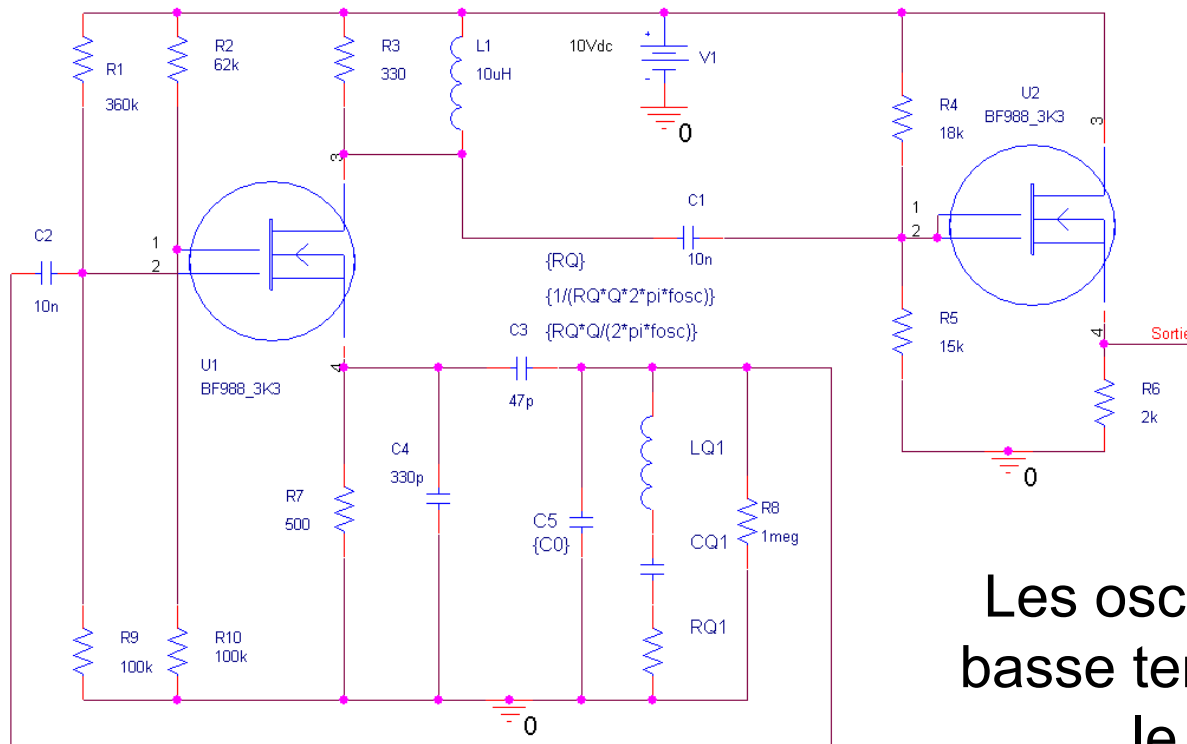
Deux oscillateurs prévus pour les mesures de bruit



# Oscillateur cryo. : Mise au point de l'oscillateur

## Seconds oscillateurs testés :

- Séparation des polarisations de grille du transistor de la boucle oscillatrice



Les oscillateurs fonctionnent à basse température mais pas sur le partiel souhaité :

Ils démarrent sur le fondamental du mode C (3,38 MHz)

→ Gain trop important sur le fondamental

# Oscillateur cryo. : Mise au point de l'oscillateur

## Troisièmes oscillateurs testés :

- Séparation des polarisations de grille et ajustement expérimental

Les deux oscillateurs fonctionnent à basse température après un stress en tension :

Ils démarrent sur partiel 3 du mode C (~ 10 MHz)

➔ La puissance d'excitation est estimée à moins de 1  $\mu\text{W}$

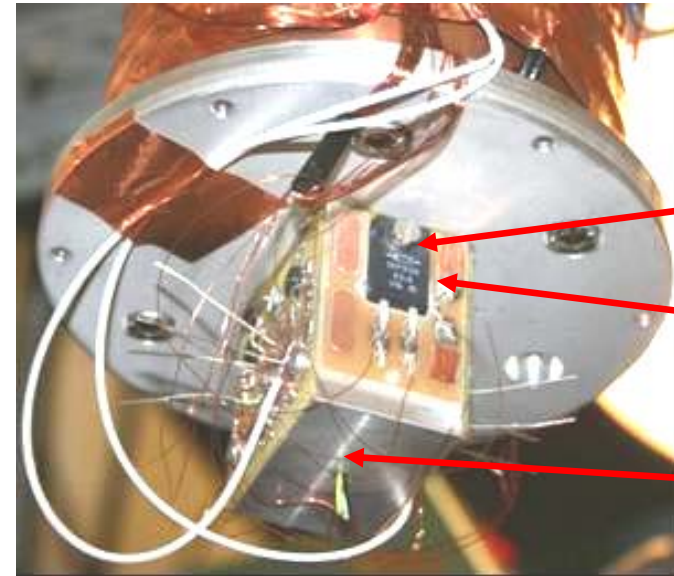
➔ Le niveau de sortie est faible : 10  $\text{mV}_{\text{RMS}}$

	Partiel 3			Partiel 5		
	Mode C	Mode B	Mode A	Mode C	Mode B	Mode A
Gain boucle ouverte $V_S/V_E$ à phase nulle	2,08	2,03	1,46	0,565	0,282	0,455
Ratio du coefficient de qualité par rapport au Q à vide à phase nulle	45,2%	46,1%	60,2%	83,9%	88,2%	86,4%
Condition de Barkhausen	Oui	Oui	Optimisé	Non	Non	Non

Résultat de simulation boucle ouverte pour les deux partiels des trois modes caractérisés

Faute de temps les investigations n'ont pas été poursuivies : ce sont ces deux oscillateurs qui ont été caractérisés

# Oscillateur cryo. : Mise au point de l'oscillateur

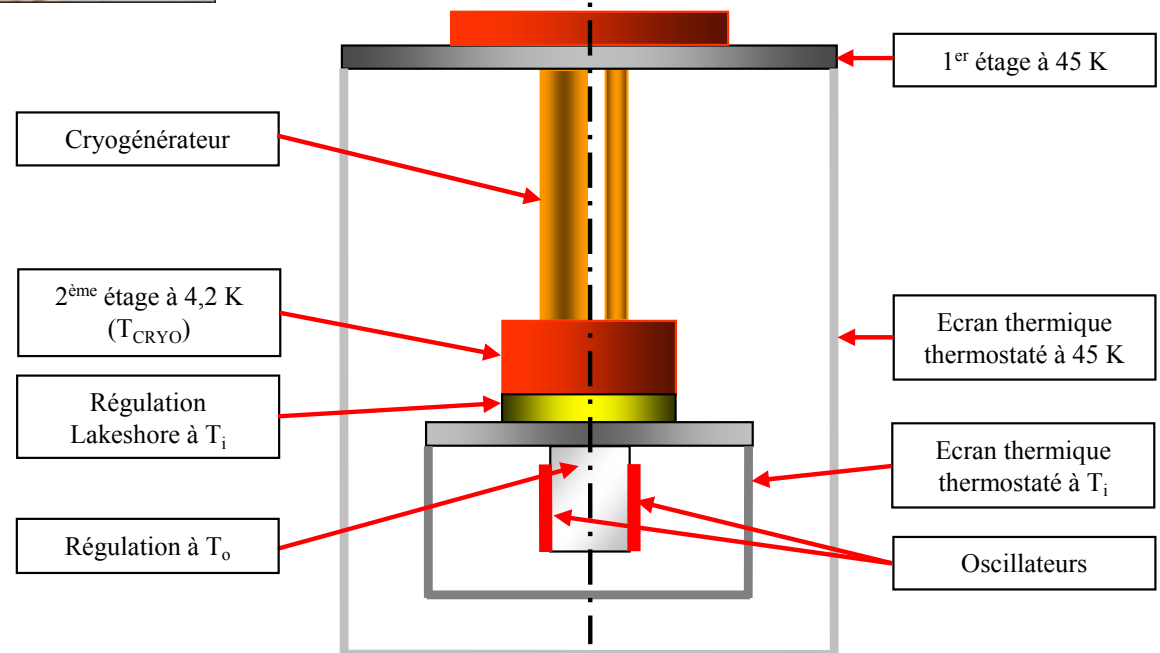


- Résistance de chauffe
- Thermistance
- Sonde de température Lakeshore

## Régulation thermique :

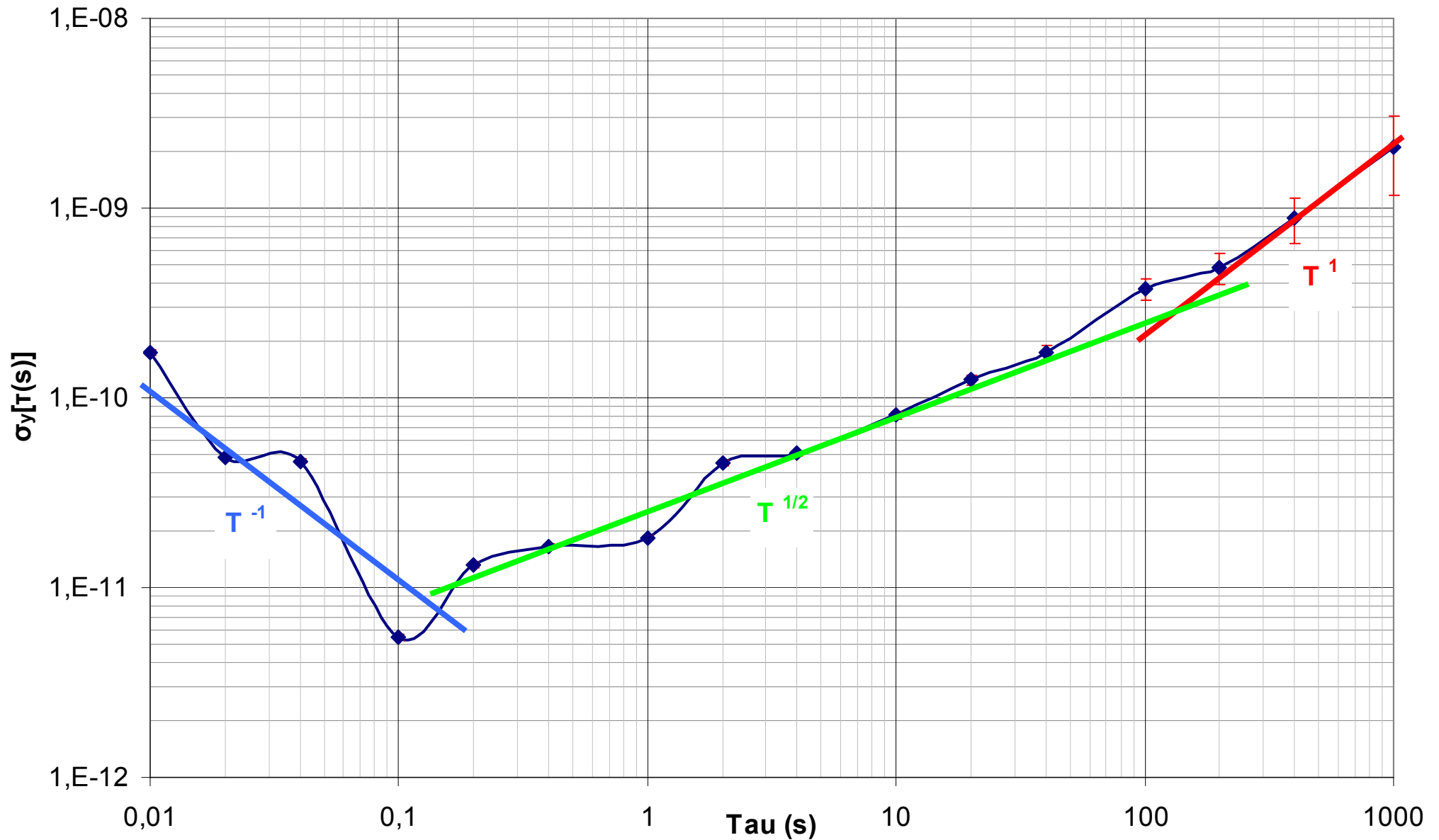
- ✓ Double thermostat
- ✓ Double écran antiradiation

→ Variation de 10 mK à 1,7 Hz avec un seul thermostat en fonctionnement



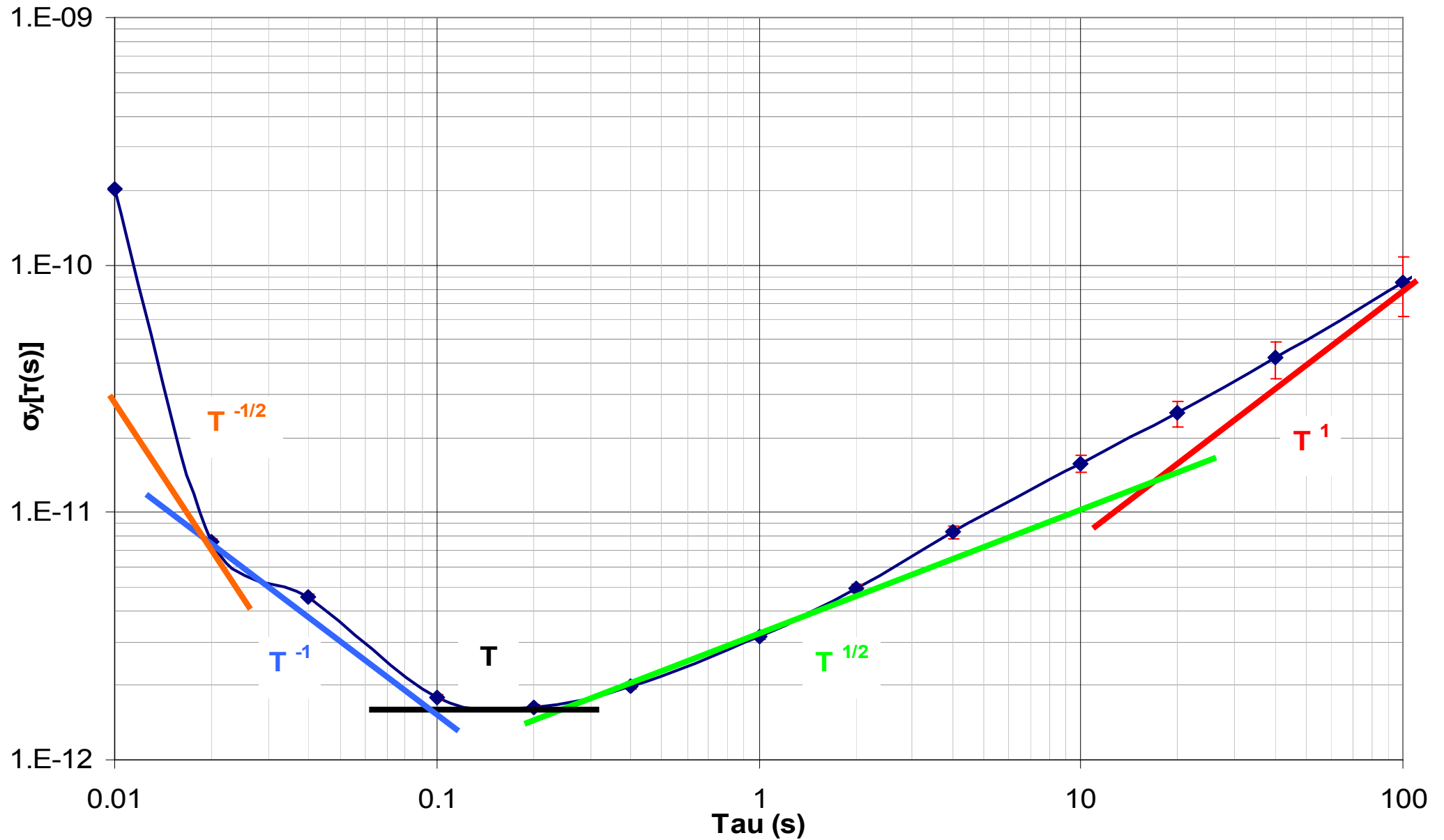
# Oscillateur cryo. : Mesure de bruit et analyse

Mesure de stabilité des deux oscillateurs cryogéniques l'un contre l'autre



# Oscillateur cryo. : Mesure de bruit et analyse

Mesure de stabilité d'un oscillateur cryogénique contre un OUS externe (10 MHz)



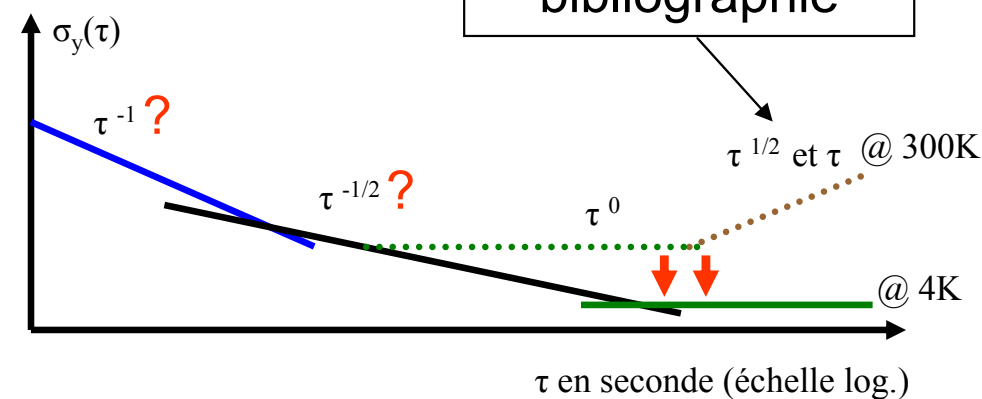
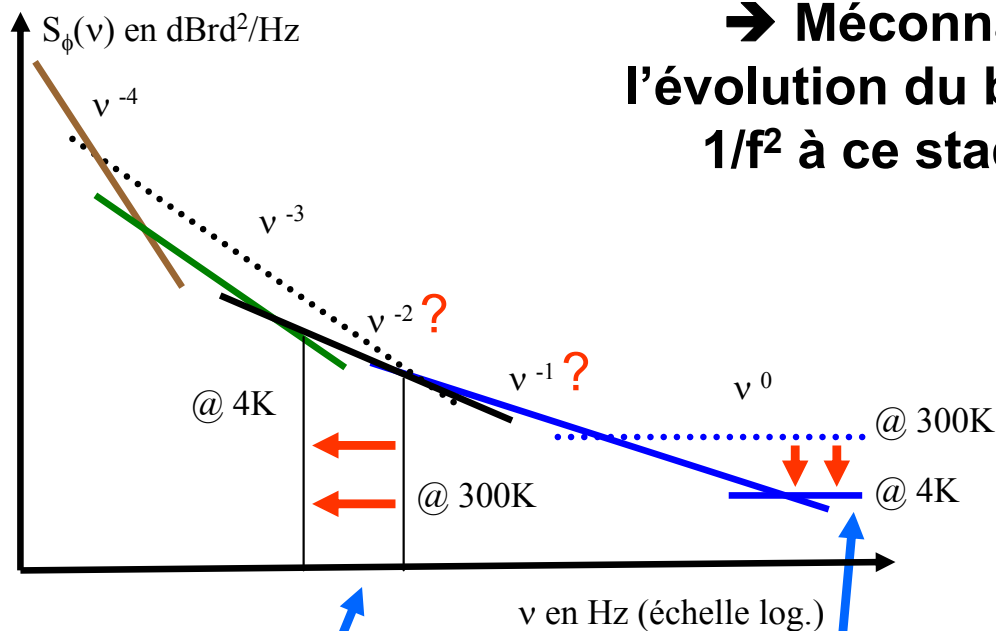
# Oscillateur cryo. : Mesure de bruit et analyse

## Limitations identifiables :

- ❑ La sensibilité accélérométrique pour des vibrations de  $\pm 9 \mu\text{m}$  sur le second étage limite la stabilité à  $y = 2 \cdot 10^{-13}$
- ❑ La sensibilité à la température pour des variations dynamiques de 10 mK limite la stabilité à  $y = 4,5 \cdot 10^{-11}$

## Comportement prévisible (espéré !) :

➔ Méconnaissance de l'évolution du bruit en  $1/f$  et en  $1/f^2$  à ce stade de l'étude




Amélioration du Q

Amélioration du bruit thermique



## Challenge de la limitation ultime du bruit propre des résonateurs acoustiques :

- ✓ Mesure record de Q de  $125 \cdot 10^6$  sur le mode A (31 MHz) à basse température
  - ✓ Caractérisation de deux résonateurs LGT à 4 K
  - ✓ Transistors testés et une référence modélisée
    - ✓ Deux oscillateurs fonctionnels mesurés
- ✓ Une première mesure de stabilité relative à 5 K



# Conclusion générale

**Le cristal de langatate a les potentialités pour remplacer le quartz dans les applications ultra-stables**

## **Oscillateurs à langatate**

- ❖ Il faut trouver un approvisionnement de qualité
  - ❖ La géométrie retenue est à revoir
- ❖ Un gabarit de recuit doit impérativement être mis au point
  - ❖ Test du bruit propre pour estimer les limites

## Challenge pour l'appréciation de la limitation ultime du bruit propre des résonateurs acoustiques et de leurs oscillateurs associés

### Oscillateurs cryogéniques

- ❖ Amortissement des vibrations en bout de tête
  - ❖ Régulation de température plus fine
- ❖ Un système de sélection doit être mis au point
- ❖ Approfondissement des phénomènes observés à basses températures
  - ❖ Modélisation plus poussée
- ❖ Des investigations pour la réalisation d'un résonateur adapté en termes de compensation de température

# Publications

## - **Articles de revues internationales avec comité de lecture :**

1. J. Imbaud, A. Assoud, R. Bourquin, J.J. Boy, S. Galliou and J.P. Romand, "Investigations on LGS and LGT crystals to realize BAW resonators", IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 55, NO. 11, pp. 2384-2391, November, 2008.
2. J. Imbaud, S. Galliou, J.P. Romand, P. Abbé and R. Bourquin, "Development of a 10 MHz oscillator working with a LGT crystal resonator: preliminary results", IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 55, NO. 9, pp. 1913-1920, September, 2008.
3. S. Galliou, J. Imbaud, R. Bourquin, N. Bazin, P. Abbe, "Quartz crystal resonators exhibiting extremely high Q-factors at cryogenic temperatures", Electronics Letters, Volume 44, Issue 14, pp. 889-890, July 3, 2008.

## - **Actes de congrès internationaux avec comité de lecture :**

1. J. Imbaud, D. Gillet, S. Galliou et F. Sthal, "Logique programmable : application à la synthèse de signaux", 7<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, Bruxelles, Octobre, 2008.
2. J. Imbaud, S. Galliou and P. Abbé, "Measurement of first langatate oscillators improved by an original simulating method", Proceedings of European Frequency and Time Forum, Toulouse, France, April 2008.
3. S. Galliou, J. Imbaud, R. Bourquin, N. Bazin, P. Abbé, "Outstanding quality factors of bulk acoustic wave resonators at cryogenic temperature", Proceedings of European Frequency and Time Forum, Toulouse, France, April 2008.
4. J. Imbaud, A. Assoud, R. Bourquin, J.J. Boy, S. Galliou and J.P. Romand, "Investigations on 10 MHz LGS and LGT crystal resonators", Proceedings of Joint Meeting European Frequency and Time Forum-IEEE International Frequency Control Symposium, Geneva, Swizerland, pp. 711-714, May 2007.
5. *J. Imbaud, S. Galliou, J.P. Romand, P. Abbé and R. Bourquin, "Noise measurements of 10 MHz LGT crystal Oscillators", Proceedings of Joint Meeting European Frequency and Time Forum-IEEE International Frequency Control Symposium, Geneva, Swizerland, pp. 1251-1254, May 2007.*

- ❑ **Toute l'équipe du laboratoire**
  - ❑ **Les membres du jury**
- ❑ **Mes parents et ma famille**

**MERCI !!!**