

ELISA

UNE RÉFÉRENCE DE FRÉQUENCE ULTRASTABLE POUR
L'AGENCE SPATIALE EUROPÉENNE

Serge Grop

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Soutenance de thèse
10 novembre 2010



1 Introduction

- Le Projet ELISA
- Etat-de-l'art avant 2007

2 Les limites de stabilité de fréquence

- L'effet Leeson

3 Le résonateur saphir à modes de galerie

- Rappels
- La sensibilité à l'accélération : limite court terme
- La sensibilité thermique : limite long terme
- Conception et caractérisation

4 Construction d'Elisa

- Les électroniques de contrôle
- Le cryogénérateur à faibles vibrations

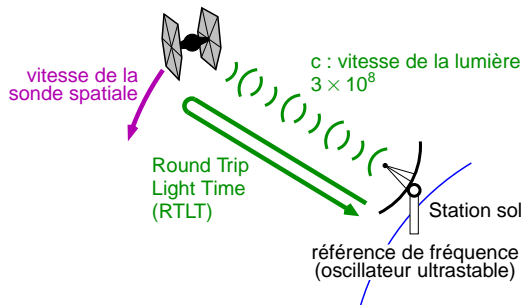
5 Résultats expérimentaux

- Caractérisation court terme : Elisa vs Alizée
- Caractérisation de la chaîne de synthèse
- Caractérisation long terme : Elisa vs MH

6 Conclusion et perspectives

Le Projet ELISA

Les **oscillateurs ultrastables** sont des systèmes qui génèrent un **signal périodique**. Grâce à leur **grande stabilité de fréquence** représentée par la déviation d'Allan, ils sont utilisés comme **référence de fréquence**.



Localisation des sondes spatiales :

Terre-ISS : 350 km

⇒ RTL = 2 ms

Terre-Lune : 384 400 km

⇒ RTL = 2,6 s

Terre-Venus : $43,2 \times 10^6$ km

⇒ RTL = 144 s

Navigation spatiale :

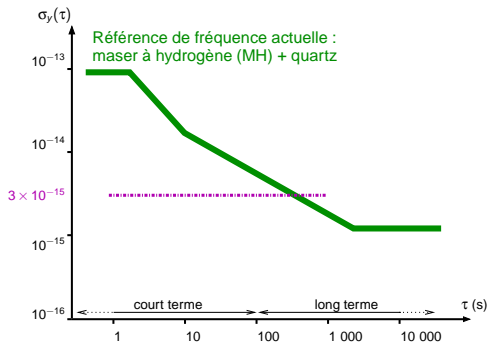
mesure de la vitesse (effet Doppler) avec une grande résolution

Le Projet ELISA

Objectif de l'ESA $\Rightarrow \sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$ pour $\tau \in [1 - 1\,000 \text{ s}]$

Référence de fréquence actuelle \Rightarrow stabilité de fréquence insuffisante

Seuls les **Oscillateurs saphir cryogéniques (CSO)** peuvent atteindre cette limite

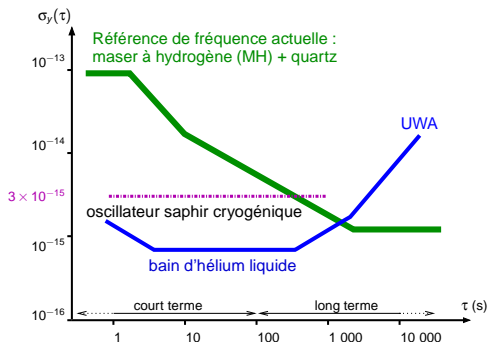


Le Projet ELISA

Objectif de l'ESA $\Rightarrow \sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$ pour $\tau \in [1 - 1\,000\text{ s}]$

Référence de fréquence actuelle \Rightarrow stabilité de fréquence insuffisante

Seuls les **Oscillateurs saphir cryogéniques (CSO)** peuvent atteindre cette limite



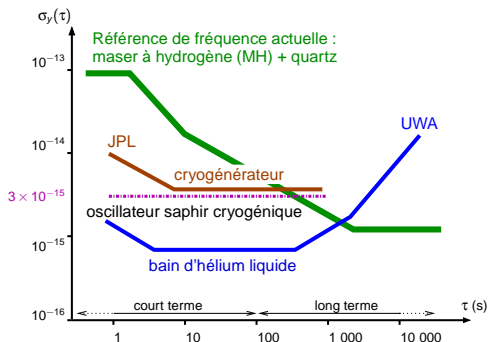
CSO à l'état-de-l'art : résonateur dans un **bain d'hélium liquide**. Fonctionnement continu de 3 semaines \Rightarrow **inutilisable pour des missions de plusieurs mois**.

Le Projet ELISA

Objectif de l'ESA $\Rightarrow \sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$ pour $\tau \in [1 - 1\,000\text{ s}]$

Référence de fréquence actuelle \Rightarrow stabilité de fréquence insuffisante

Seuls les **Oscillateurs saphir cryogéniques (CSO)** peuvent atteindre cette limite



CSO à l'état-de-l'art : résonateur dans un **bain d'hélium liquide**. Fonctionnement continu de 3 semaines \Rightarrow **inutilisable pour des missions de plusieurs mois**.

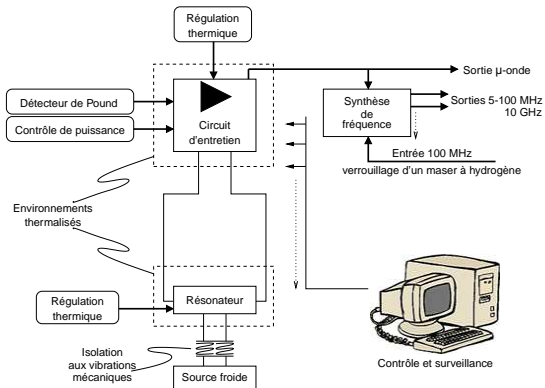
Solution : **cryogénérateur**,
fonctionnement continu de 2 ans
 $\Rightarrow 3 \times 10^{-15}$: **jamais démontré!**

Véritable challenge pour l'équipe temps-fréquence de l'Institut FEMTO-ST!

Le Projet ELISA

Les partenaires

Schématique de l'architecture générale d'Elisa



Financement :

European Space Agency

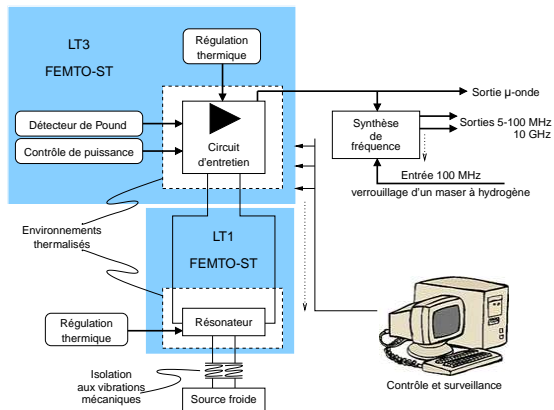
Partenaires :

FEMTO-ST
National Physical Laboratory
Timetech GmbH

Le Projet ELISA

Les partenaires

Schématique de l'architecture générale d'Elisa



Financement :

European Space Agency

Partenaires :

FEMTO-ST

National Physical Laboratory

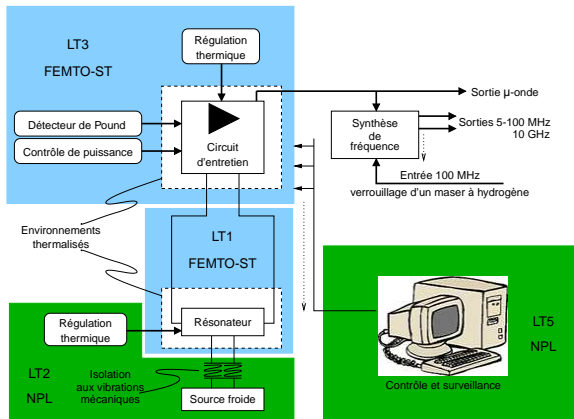
Timetech GmbH

Lot de travaux	Définition	Equipe
LT0	coordination	FEMTO-ST
LT6	intégration de l'ensemble et validation	FEMTO-ST

Le Projet ELISA

Les partenaires

Schématique de l'architecture générale d'Elisa



Financement :

European Space Agency

Partenaires :

FEMTO-ST

National Physical Laboratory

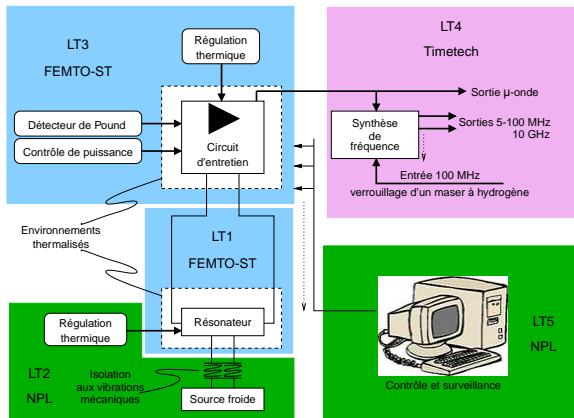
Timetech GmbH

Lot de travaux	Définition	Equipe
LT0	coordination	FEMTO-ST
LT6	intégration de l'ensemble et validation	FEMTO-ST

Le Projet ELISA

Les partenaires

Schématique de l'architecture générale d'Elisa



Financement :

European Space Agency

Partenaires :

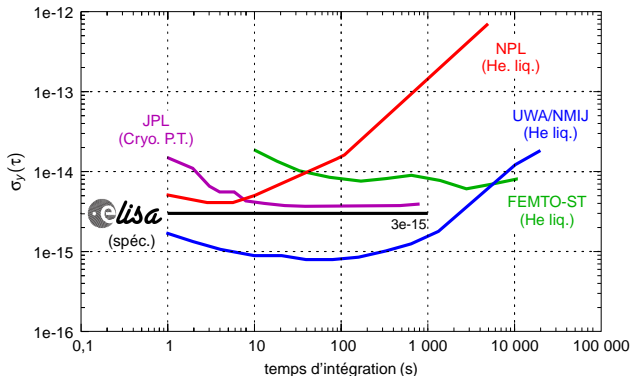
FEMTO-ST

National Physical Laboratory

Timetech GmbH

Lot de travaux	Définition	Equipe
LT0	coordination	FEMTO-ST
LT6	intégration de l'ensemble et validation	FEMTO-ST

Etat-de-l'art avant 2007



Oscillateurs	Q_0	Meilleures Stabilités	stab. approx. par jour	Température
UWA/NMIJ	1×10^9	6×10^{-16}	6×10^{-14}	He L.
FEMTO-ST	7×10^8	7×10^{-15}	2×10^{-14}	He L.
NPL	1×10^9	4×10^{-15}	8×10^{-12}	He L.
JPL (Saphir-rubis)	1×10^9	4×10^{-15}	1×10^{-13}	P.T

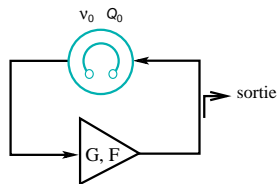
Première étape du projet :

définir les paramètres pour obtenir $\sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$
pour $\tau \in [1 - 1\,000 \text{ s}]$

- facteur de qualité en charge Q_L
- contrôle thermique ΔT
- contrôle de puissance $\Delta P/P \dots$

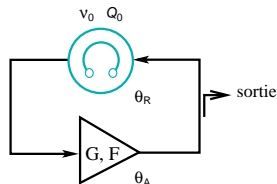
L'effet Leeson

Oscillateur simple



Limite des oscillateurs saphirs cryogéniques

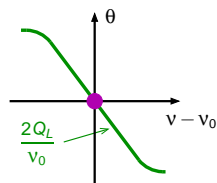
Oscillateur simple



$$\theta_R + \theta_A = 0 + 2k\pi \text{ rad}$$

Si $v = v_0$ alors $\theta_R = 0 \Rightarrow \theta_A = 0$

Fonction de transfert du résonateur (phase)

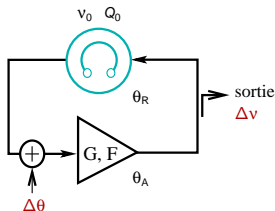


Conditions d'oscillation :

- Pertes du résonateur compensées par le gain apporté par l'amplificateur
- Interférence constructive : $\theta_R + \theta_A = 0 + 2k\pi \text{ rad}$

Limite des oscillateurs saphirs cryogéniques

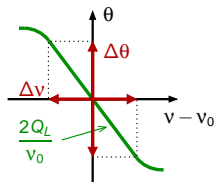
Oscillateur simple



$$\theta_R + \theta_A = 0 + 2k\pi \text{ rad}$$

Si $v = v_0$ alors $\theta_R = 0 \Rightarrow \theta_A = 0$
 cas réel : $\theta_A = \Delta\theta \Rightarrow \theta_R = -\Delta\theta$

Fonction de transfert du résonateur (phase)



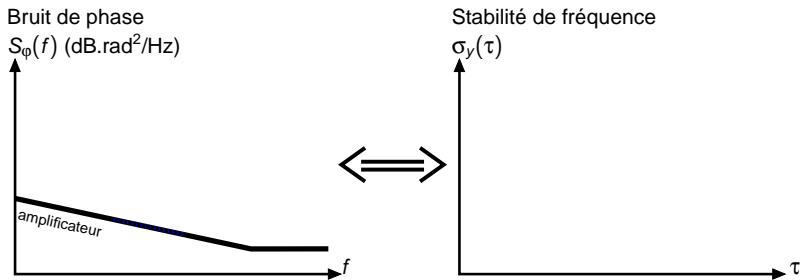
Conditions d'oscillation :

- Pertes du résonateur compensées par le gain apporté par l'amplificateur
- Interférence constructive : $\theta_R + \theta_A = 0 + 2k\pi \text{ rad}$

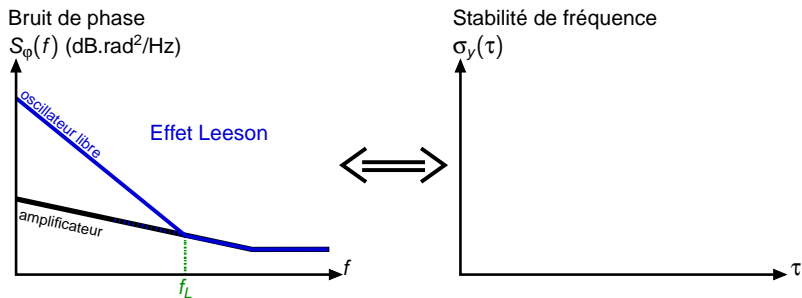
Formule de Leeson :

$$S_{\varphi}(f) = \left(1 + \left(\frac{v_0}{2Q_L}\right)^2 \frac{1}{f^2}\right) S_{\theta}(f) \text{ avec } \frac{v_0}{2Q_L} = f_L \text{ la fréquence de Leeson}$$

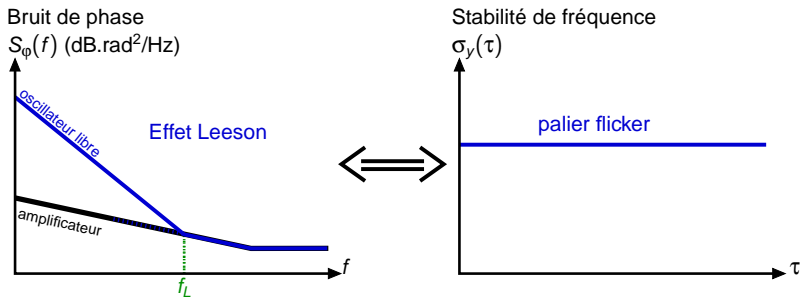
L'effet Leeson



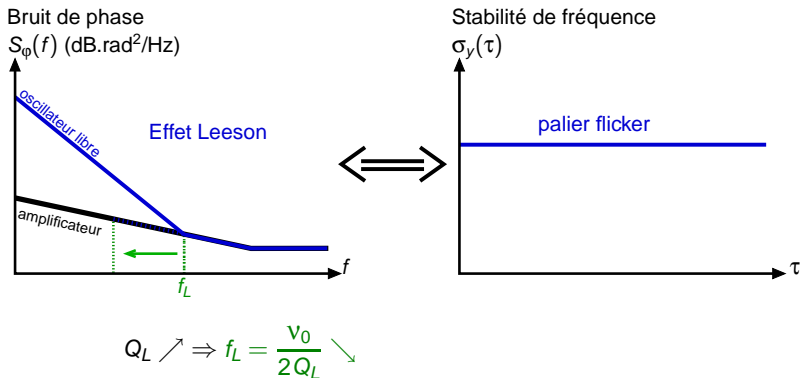
L'effet Leeson



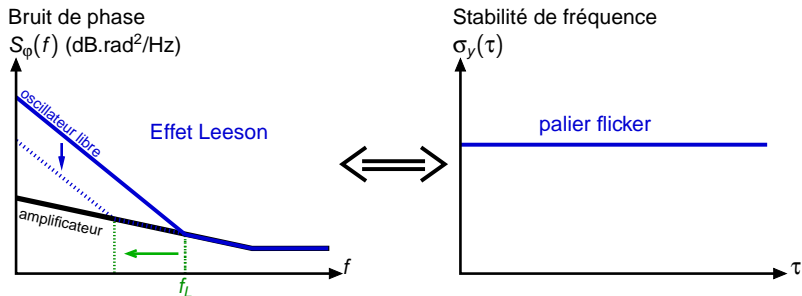
L'effet Leeson



L'effet Leeson

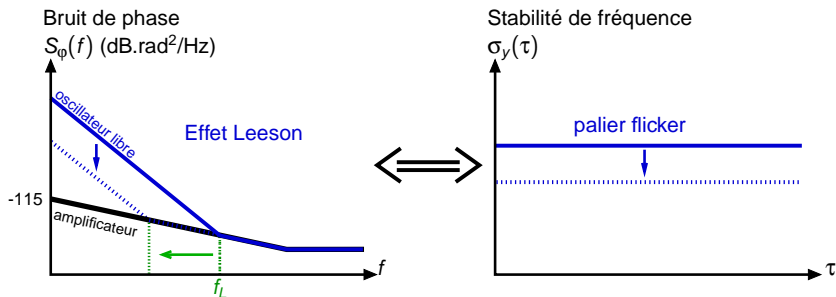


L'effet Leeson



$$Q_L \nearrow \Rightarrow f_L = \frac{\nu_0}{2Q_L} \searrow \Rightarrow S_{\varphi}^{\text{oscillateur}} \searrow$$

L'effet Leeson



$$Q_L \nearrow \Rightarrow f_L = \frac{\nu_0}{2Q_L} \searrow \Rightarrow S_{\phi}^{\text{oscillateur}} \searrow \Rightarrow \sigma_y(\tau) \searrow$$

Pour atteindre 3×10^{-15} avec $b_{-1} = -115 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}@1 \text{ Hz}$

$$Q_L \geq 350 \times 10^6$$

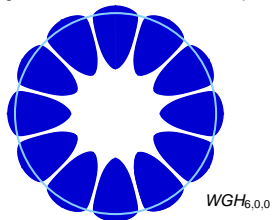
Seuls les résonateurs saphirs refroidis à 4,2 K peuvent atteindre un tel Q_L

Le résonateur saphir à modes de galerie

Le saphir présente les plus faibles pertes diélectriques $\tan \delta$ dans le domaine des fréquences μ -ondes

$\tan \delta$ chute vers les T° cryo. $\Rightarrow \nearrow$ facteur de qualité
 Faible permittivité diélectrique $[\epsilon]$ $\Rightarrow TE_{01\delta}$ inapproprié

Energie stockée interface air/diélectrique



Solution : **modes de galerie WG** \Rightarrow
 $Q_0 \sim \frac{1}{\tan \delta} \sim 10^9 @ 4,2 \text{ K}$

Les résonateurs saphirs sont sensibles aux vibrations mécaniques et aux variations thermiques

Sensibilité à l'accélération : limite court terme

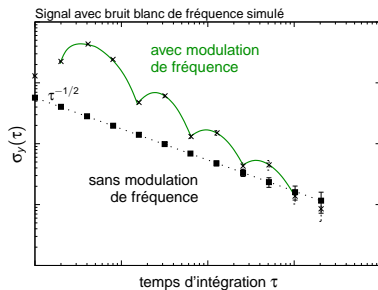
Lorsque le résonateur est soumis à des vibrations, il se déforme et cela modifie sa fréquence de résonance

Cet effet se traduit par une **modulation de fréquence du signal de sortie** de l'oscillateur à la fréquence des vibrations

Sensibilité à l'accélération : limite court terme

Lorsque le résonateur est soumis à des vibrations, il se déforme et cela modifie sa fréquence de résonance

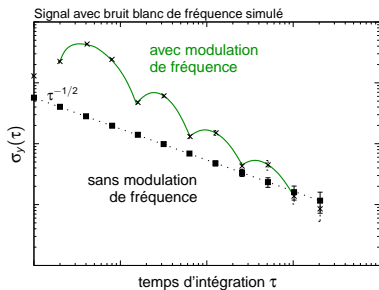
Cet effet se traduit par une **modulation de fréquence du signal de sortie** de l'oscillateur à la fréquence des vibrations \Rightarrow peut **masquer la stabilité de fréquence intrinsèque**.



Sensibilité à l'accélération : limite court terme

Lorsque le résonateur est soumis à des vibrations, il se déforme et cela modifie sa fréquence de résonance

Cet effet se traduit par une **modulation de fréquence du signal de sortie** de l'oscillateur à la fréquence des vibrations \Rightarrow peut **masquer la stabilité de fréquence intrinsèque**.



Déplacement au niveau du résonateur :

$$z(t) = Z_0 \sin(2\pi f_{Mod} t) \quad \text{m}$$

Alors l'accélération γ :

$$\gamma = \frac{d^2 z}{dt^2} = -4\pi^2 f_{Mod}^2 Z_0 \sin(2\pi f_{Mod} t) \quad \text{m.s}^{-2}$$

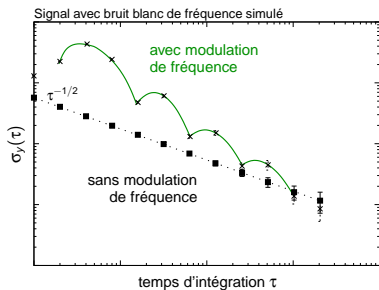
$S_\gamma = \frac{\Delta v}{v_0} / \gamma$ (s²/m) sensibilité de v_0 à γ , alors :

$$\left| \frac{\Delta v}{v_0} \right| = 4\pi^2 f_{Mod}^2 Z_0 \sin(2\pi f_{Mod} t) S_\gamma$$

Sensibilité à l'accélération : limite court terme

Lorsque le résonateur est soumis à des vibrations, il se déforme et cela modifie sa fréquence de résonance

Cet effet se traduit par une **modulation de fréquence du signal de sortie** de l'oscillateur à la fréquence des vibrations \Rightarrow peut **masquer la stabilité de fréquence intrinsèque**.



Déplacement au niveau du résonateur :

$$z(t) = Z_0 \sin(2\pi f_{Mod} t) \quad \text{m}$$

Alors l'accélération γ :

$$\gamma = \frac{d^2z}{dt^2} = -4\pi^2 f_{Mod}^2 Z_0 \sin(2\pi f_{Mod} t) \quad \text{m.s}^{-2}$$

$$S_\gamma = \frac{\Delta v}{v_0} / \gamma \text{ (s}^2/\text{m)} \text{ sensibilité de } v_0 \text{ à } \gamma, \text{ alors :}$$

$$\left| \frac{\Delta v}{v_0} \right| = 4\pi^2 f_{Mod}^2 Z_0 \sin(2\pi f_{Mod} t) S_\gamma$$

Déplacement résiduel du résonateur

$$Z_0 \leq 2,3 \mu\text{m}$$

En considérant $f_{Mod} = 1 \text{ Hz}$ et $S_\gamma = 3,2 \times 10^{-10}/\text{g}$

Sensibilité thermique : limite long terme

La sensibilité thermique limite la stabilité à long terme

Sensibilité thermique : limite long terme

La sensibilité thermique limite la stabilité à long terme

- Fluctuations thermiques de l'environnement cryogénique \Rightarrow dérive de ν_0

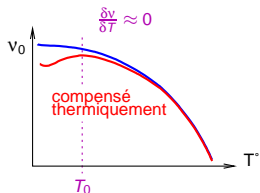
Sensibilité de -1 ppm/K@4 K $\Rightarrow 3 \times 10^{-15}$, **contrôle thermique à 10 nK : impossible !**

Sensibilité thermique : limite long terme

La sensibilité thermique limite la stabilité à long terme

- Fluctuations thermiques de l'environnement cryogénique \Rightarrow dérive de ν_0

Sensibilité de $-1 \text{ ppm/K@4 K} \Rightarrow 3 \times 10^{-15}$, **contrôle thermique à 10 nK : impossible !**



Présence naturelle de Mo^{3+} dans le saphir de type HEMEX
 \Rightarrow **compensation thermique naturelle pour $T_0 \in [4 - 10 \text{ K}]$**

Stabilité de 3×10^{-15} si

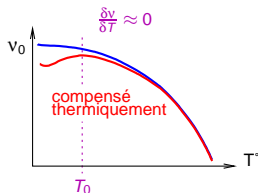
$\Delta T \leq 1 \text{ mK} \Rightarrow$ avec contrôle thermique commercial

Sensibilité thermique : limite long terme

La sensibilité thermique limite la stabilité à long terme

- Fluctuations thermiques de l'environnement cryogénique \Rightarrow dérive de ν_0

Sensibilité de $-1 \text{ ppm/K@4 K} \Rightarrow 3 \times 10^{-15}$, **contrôle thermique à 10 nK : impossible !**



Présence naturelle de Mo^{3+} dans le saphir de type HEMEX
 \Rightarrow **compensation thermique naturelle pour $T_0 \in [4 - 10 \text{ K}]$**

Stabilité de 3×10^{-15} si

$\Delta T \leq 1 \text{ mK} \Rightarrow$ avec contrôle thermique commercial

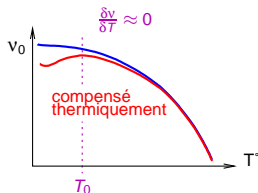
- Fluctuations de la puissance injectée dans le résonateur \Rightarrow réchauffement local du résonateur + pression de radiation

Sensibilité thermique : limite long terme

La sensibilité thermique limite la stabilité à long terme

- Fluctuations thermiques de l'environnement cryogénique \Rightarrow dérive de ν_0

Sensibilité de -1 ppm/K@4 K $\Rightarrow 3 \times 10^{-15}$, **contrôle thermique à 10 nK : impossible!**



Présence naturelle de Mo^{3+} dans le saphir de type HEMEX
 \Rightarrow **compensation thermique naturelle pour $T_0 \in [4 - 10 \text{ K}]$**

Stabilité de 3×10^{-15} si

$\Delta T \leq 1 \text{ mK} \Rightarrow$ avec contrôle thermique commercial

- Fluctuations de la puissance injectée dans le résonateur \Rightarrow réchauffement local du résonateur + pression de radiation

En admettant la sensibilité à la puissance du résonateur :

$$\frac{1}{\Delta P} \frac{\Delta \nu}{\nu_0} = 4 \times 10^{-8} \text{ W}^{-1}$$

Limite du contrôle de puissance

$$\frac{\Delta P}{P} \leq 7,5 \times 10^{-4}$$

$P = -10 \text{ dBm}$

Fluctuations de phase de la boucle d'entretien

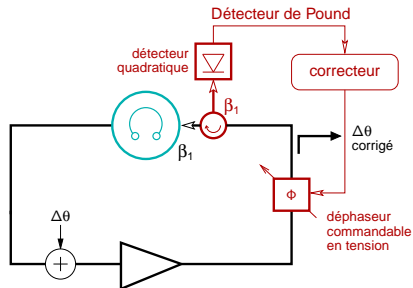
Fortes variations de phase le long de circuit d'entretien

En considérant uniquement les câbles μ -ondes

$$\frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta v}{v_0} = \frac{2\pi}{Q_L} \frac{L_0}{\lambda_0} \alpha_{cu} \approx 1,8 \times 10^{-11} \text{ K}^{-1}$$

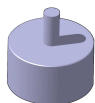
avec $L_0 = 3 \text{ m}$, $Q_L = 350 \times 10^6$, $\lambda_0 = \frac{c}{v_0} = 30 \text{ mm}$, $\alpha_{cu} = 1,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

La phase doit être corrigée
 \Rightarrow détecteur de Pound

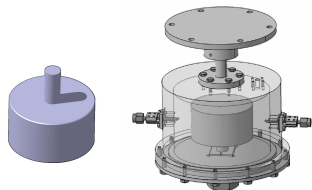


Méthode de couplage

Le résonateur est placé dans une cavité en cuivre.



Méthode de couplage



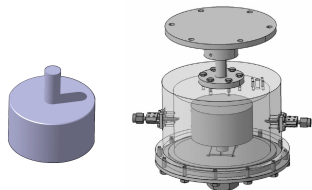
Le résonateur est placé dans une cavité en cuivre.

Cavité fermée :

- Fort Q_L
 - Nombreux modes parasites
- ⇒ Version finale

L'échange d'énergie avec l'extérieur se fait via des sondes de couplage.
Leurs **orientations et positionnements** définissent la **famille de mode excitée**
et le **coefficient de couplage** β_i .

Méthode de couplage



Le résonateur est placé dans une cavité en cuivre.

Cavité fermée :

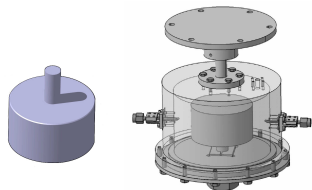
- Fort Q_L
 - Nombreux modes parasites
- ⇒ Version finale

L'échange d'énergie avec l'extérieur se fait via des sondes de couplage.
Leurs **orientations et positionnements** définissent la **famille de mode excitée**
et le **coefficient de couplage** β_i .

Objectifs à T_0 :

- En entrée : $\beta_1 \approx 1$
⇒ maximise la sensibilité du détecteur de Pound
- En sortie : $\beta_2 \ll 1$
⇒ maximise Q_L

Méthode de couplage



Le résonateur est placé dans une cavité en cuivre.

Cavité fermée :

- Fort Q_L
 - Nombreux modes parasites
- ⇒ Version finale

L'échange d'énergie avec l'extérieur se fait **via des sondes de couplage**.
Leurs **orientations et positionnements** définissent la **famille de mode excitée**
et le **coefficient de couplage** β_i .

Objectifs à T_0 :

- En entrée : $\beta_1 \approx 1$
⇒ maximise la sensibilité du détecteur de Pound
- En sortie : $\beta_2 \ll 1$
⇒ maximise Q_L

Relation coefficient β_1 ambiante/4,2 K

$$\frac{\beta_1^{4,2 \text{ K}}}{\beta_1^{300 \text{ K}}} = \frac{Q_0^{4,2 \text{ K}}}{Q_0^{300 \text{ K}}}$$

Avec les valeurs typiques : $\beta_1^{300 \text{ K}} = 2 \times 10^{-4} \Rightarrow$ mode difficilement observable à T° ambiante.

Besoin de plusieurs cycles thermiques avant d'obtenir un couplage critique

Récapitulatifs

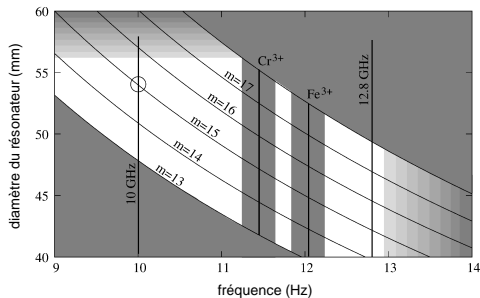
Tableau récapitulatif

$Q_L \geq 350 \times 10^6$	$Z_0 \leq 2,3 \mu\text{m}$	$\Delta T \leq 1\text{mK}$	$\Delta P/P \leq 7,5 \times 10^{-4}$	$\beta_1 \approx 1 @ T_0$

Conception des résonateurs Elisa et Alizée

Choix du mode et de ses caractéristiques

Choix des caractéristiques du mode de résonance

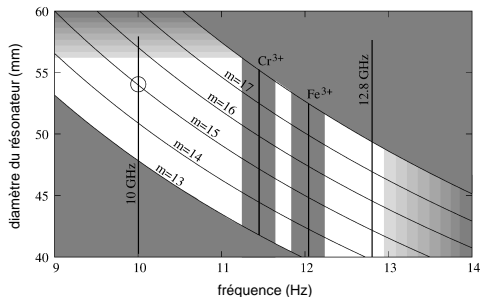


mode $\text{WGH}_{15,0,0}$
 $\nu_0 = 10 \text{ GHz}$

Conception des résonateurs Elisa et Alizée

Choix du mode et de ses caractéristiques

Choix des caractéristiques du mode de résonance



mode WGH_{15,0,0}
 $\nu_0 = 10 \text{ GHz}$

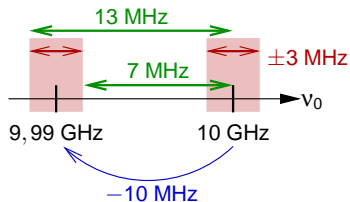
Une fréquence “ronde” est impossible à obtenir à cause des tolérances d’usinage :

$$\Delta\phi = \pm 10 \mu\text{m}$$

$$\Delta H = \pm 20 \mu\text{m}$$

Conception des résonateurs Elisa et Alizée

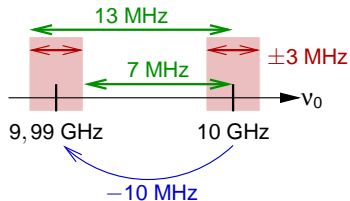
Choix du mode et de ses caractéristiques



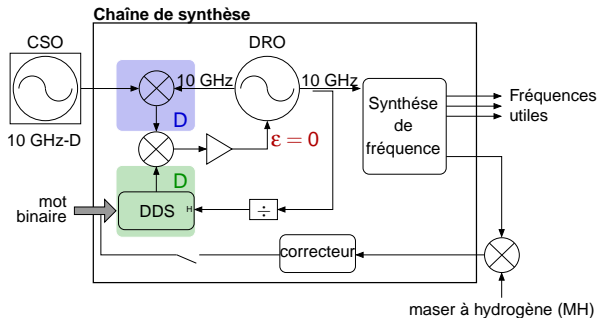
Intervalle de confiance $D = 10$ MHz \Rightarrow
facilement compensable via un DDS

Conception des résonateurs Elisa et Alizée

Choix du mode et de ses caractéristiques



Intervalle de confiance $D = 10$ MHz \Rightarrow
facilement compensable via un DDS



Conception du résonateur

Calcul des dimensions et vérification

Paramètre déterminant dans le calcul \Rightarrow permittivité du saphir $[\epsilon]$

Comparaison des simulations et mesures des fréquences de nos anciens résonateurs, $[\epsilon]$ @4,2K

$$\epsilon_{\perp} = \mathbf{9,270\ 688}$$

$$\epsilon_{//} = \mathbf{11,340\ 286}$$

Conception du résonateur

Calcul des dimensions et vérification

Paramètre déterminant dans le calcul \Rightarrow permittivité du saphir $[\epsilon]$

Comparaison des simulations et mesures des fréquences de nos anciens résonateurs, $[\epsilon]$ @4,2K

$$\epsilon_{\perp} = 9,270\ 688$$

$$\epsilon_{//} = 11,340\ 286$$

Ce résultat associé aux précédents paramètres : **WG_{H15,0,0} = 9,990 GHz**

\Rightarrow Calcul des dimensions finales : méthode par éléments finis

$$\text{WG}_{H15,0,0} = 9,989\ 89\ \text{GHz} \pm 3,5\ \text{MHz}$$

$$\phi = 54,2\ \text{mm} \pm 10\ \mu\text{m}$$

$$H = 30\ \text{mm} \pm 20\ \mu\text{m}$$

$$\frac{1}{\Delta\phi} \frac{\Delta\nu}{\nu} = 2 \times 10^{-2} / \text{mm} \quad \frac{1}{\Delta H} \frac{\Delta\nu}{\nu} = 2 \times 10^{-3} / \text{mm}$$

Alizée - Elisa



Conception du résonateur

Calcul des dimensions et vérification

Paramètre déterminant dans le calcul \Rightarrow permittivité du saphir $[\epsilon]$

Comparaison des simulations et mesures des fréquences de nos anciens résonateurs, $[\epsilon]$ @4,2K

$$\epsilon_{\perp} = 9,270\ 688$$

$$\epsilon_{//} = 11,340\ 286$$

Ce résultat associé aux précédents paramètres : **WGH_{15,0,0} = 9,990 GHz**

\Rightarrow Calcul des dimensions finales : méthode par éléments finis

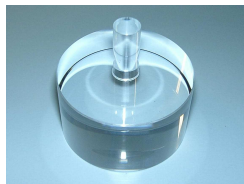
$$\mathbf{WGH_{15,0,0} = 9,989\ 89\ GHz \pm 3,5\ MHz}$$

$$\mathbf{\phi = 54,2\ mm \pm 10\ \mu m}$$

$$\mathbf{H = 30\ mm \pm 20\ \mu m}$$

$$\frac{1}{\Delta\phi} \frac{\Delta\nu}{\nu} = 2 \times 10^{-2} / \text{mm} \quad \frac{1}{\Delta H} \frac{\Delta\nu}{\nu} = 2 \times 10^{-3} / \text{mm}$$

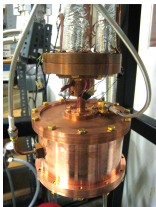
Alizée - Elisa



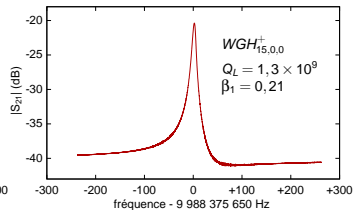
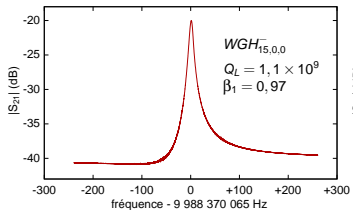
Mesure des dimensions avec instrument de mesure optique sans contact
Méthode "mode matching" \Rightarrow conformité par rapport au cahier des charges

Refroidissement d'Alizée en cavité fermée et cryogénérateur PT405

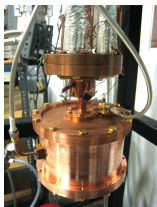
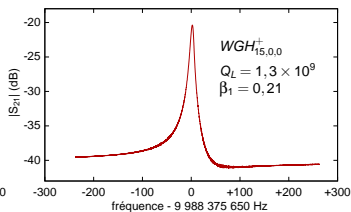
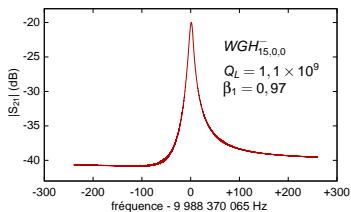
boucle/antenne à
180°



Dégénérescence du mode $WGH_{15,0,0}$



Refroidissement d'Alizée en cavité fermée et cryogénérateur PT405

boucle/antenne à
180°Dégénérescence du mode $WGH_{15,0,0}$ 

Sélection modale : rotation du résonateur d'un angle $\alpha = \frac{1}{m} \arctan \sqrt{\frac{\beta_1^-}{\beta_1^+}} = \pm 1,7^\circ$

Après rotation du résonateur, le mode $WGH_{15,0,0}^+$ est fortement atténué

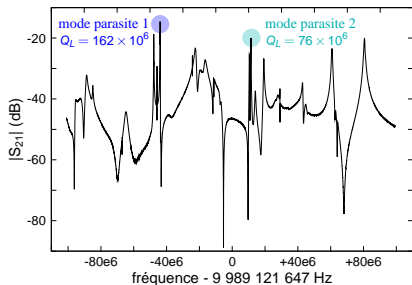
mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L	β_1	T_0 K
$WGH_{15,0,0}^-$	9,988 369	-19,7	-20	710×10^6	0,9	6,2



Objectifs atteints : $Q_L \geq 350 \times 10^6$ et $\beta_1 \approx 1$

Elisa et les modes parasites

mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L	β_1
$WGH_{15,0,0}^-$	9,989 121	-25,2	-31	1×10^9	0,95
$WGH_{15,0,0}^+$	9,989 126	-43	??	??	??



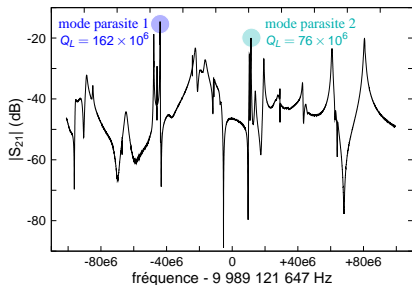
Présence de 2 modes parasites plus fortement couplés \Rightarrow impossibilité d'exploiter le mode $WGH_{15,0,0}^-$

mode parasite	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB
1	9,946 129	-15,2	-4,9
2	10,000 525	-21,1	-2,93

Forts $Q_L \Rightarrow$ modes $WGH_{m,n \neq 0, l \neq 0}$

Elisa et les modes parasites

mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L	β_1
$WGH_{15,0,0}^-$	9,989 121	-25,2	-31	1×10^9	0,95
$WGH_{15,0,0}^+$	9,989 126	-43	??	??	??



Présence de 2 modes parasites plus fortement couplés \Rightarrow impossibilité d'exploiter le mode $WGH_{15,0,0}^-$

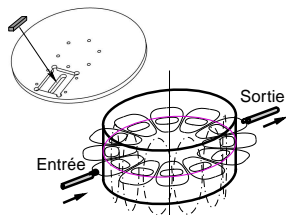
mode parasite	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB
1	9,946 129	-15,2	-4,9
2	10,000 525	-21,1	-2,93

Forts $Q_L \Rightarrow$ modes $WGH_{m,n \neq 0, l \neq 0}$

Impératif d'atténuer les modes parasites \Rightarrow sélection modale

Sélection modale

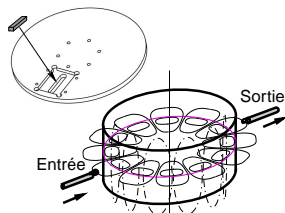
- ajout d'une pièce d'absorbant μ -onde dans la cavité + boucle/boucle à 180°



mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L
parasite 1	9,944	-34	-1,5	55×10^3
$WGH_{15,0,0}^-$	9,989 118	-35,6	-0,6	470×10^6
$WGH_{15,0,0}^+$	9,989 123	-23	-14	400×10^6
parasite 2	10	-35	-0,6	58×10^6

Sélection modale

- ajout d'une pièce d'absorbant μ -onde dans la cavité + boucle/boucle à 180°



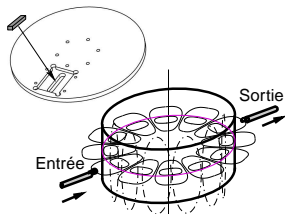
mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L
parasite 1	9,944	-34	-1,5	55×10^3
$WGH_{15,0,0}^-$	9,989 118	-35,6	-0,6	470×10^6
$WGH_{15,0,0}^+$	9,989 123	-23	-14	400×10^6
parasite 2	10	-35	-0,6	58×10^6



Forte atténuation des modes parasites
 \Rightarrow **sélection modale efficace**

Sélection modale

- ajout d'une pièce d'absorbant μ -onde dans la cavité + boucle/boucle à 180°



mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L
parasite 1	9,944	-34	-1,5	55×10^3
$WGH_{15,0,0}^-$	9,989 118	-35,6	-0,6	470×10^6
$WGH_{15,0,0}^+$	9,989 123	-23	-14	400×10^6
parasite 2	10	-35	-0,6	58×10^6



Forte atténuation des modes parasites
 \Rightarrow **sélection modale efficace**

Résultat final après plusieurs refroidissements :

mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L	β_1	T_0 K
$WGH_{15,0,0}^-$	9,989 120	-46	-0,2	477×10^6	0,01	?
$WGH_{15,0,0}^+$	9,989 125	-26,1	-57	336×10^6	1	6,1



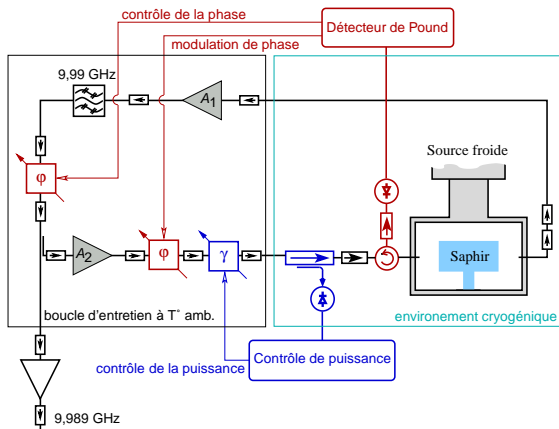
Objectifs atteints : $Q_L \approx 350 \times 10^6$ et $\beta_1 \approx 1$

Récapitulatifs

Tableau récapitulatif

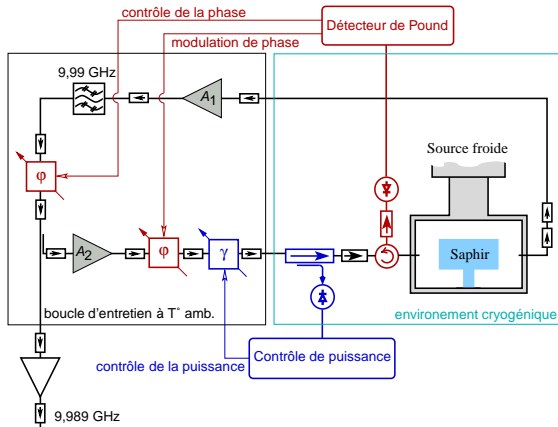
$Q_L \geq 350 \times 10^6$	$Z_0 \leq 2,3 \mu\text{m}$	$\Delta T \leq 1\text{mK}$	$\Delta P/P \leq 7,5 \times 10^{-4}$	$\beta_1 \approx 1 @ T_0$
OK				OK

Boucle d'entretien



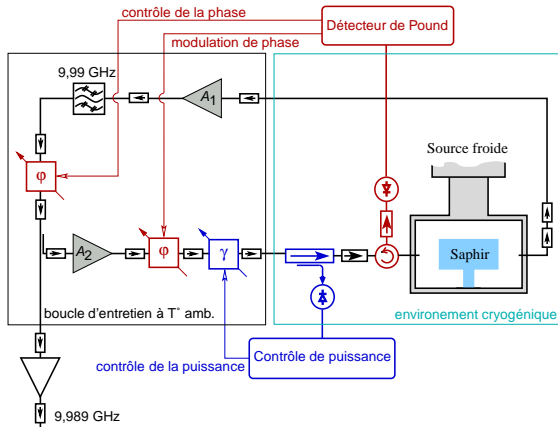
- le résonateur saphir
- le ou les amplificateurs d'entretien

Boucle d'entretien



- le résonateur saphir
- le ou les amplificateurs d'entretien
- le filtre sélectif
- le détecteur de Pound
- le contrôle de puissance
- les régulations de température

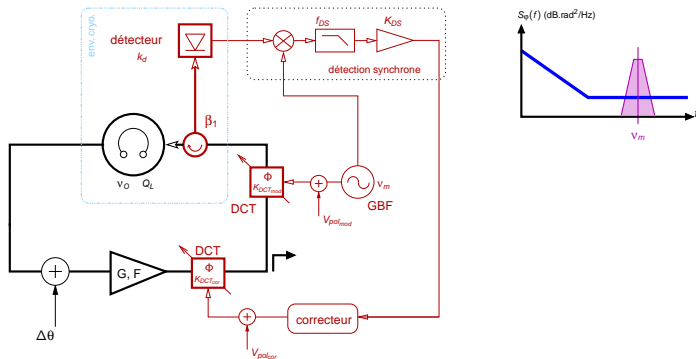
Boucle d'entretien



- le résonateur saphir
- le ou les amplificateurs d'entretien
- le filtre sélectif
- le détecteur de Pound
- le contrôle de puissance
- les régulations de température
- l'environnement cryogénique

Le détecteur de Pound : principe

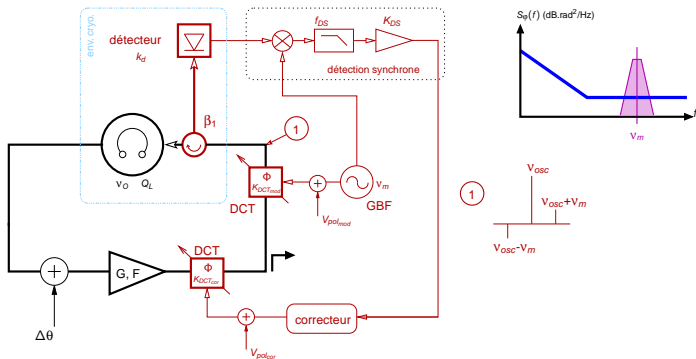
Détecteur de Pound : détection hétérodyne \Rightarrow bruit blanc de fréquence



Tension de sortie V_{DS} de la détection synchrone :

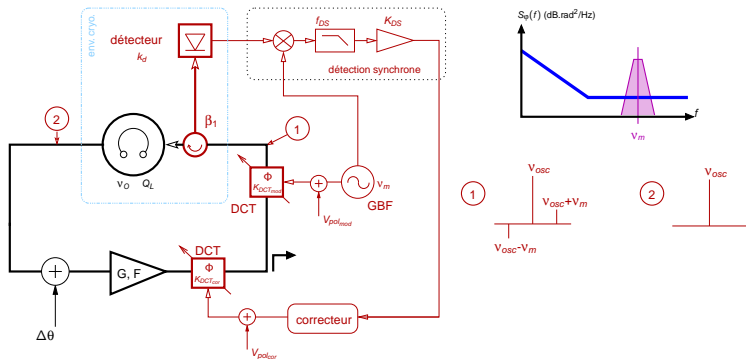
$$V_{DS} = -2k_d P_{inj} K_{DS} \phi_m \frac{4Q_0 \beta_1}{v_0 (1 + \beta_1 + \beta_2)^2} (v_{osc} - v_0) = D \times K_{DS} \times (v_{osc} - v_0)$$

Le détecteur de Pound : principe

Détecteur de Pound : détection hétérodyne \Rightarrow bruit blanc de fréquenceTension de sortie V_{DS} de la détection synchrone :

$$V_{DS} = -2k_d P_{inj} K_{DS} \phi_m \frac{4Q_0 \beta_1}{v_0 (1 + \beta_1 + \beta_2)^2} (v_{osc} - v_0) = D \times K_{DS} \times (v_{osc} - v_0)$$

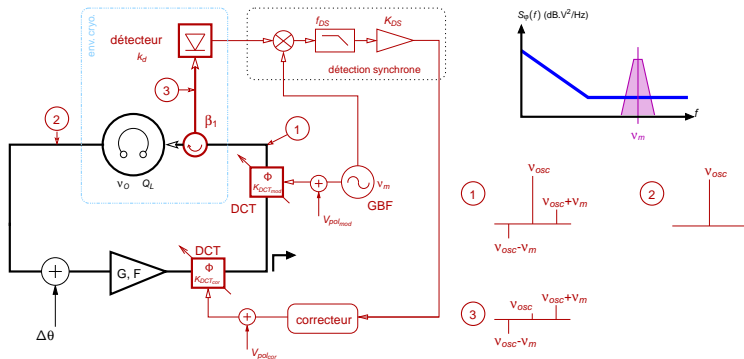
Le détecteur de Pound : principe

Détecteur de Pound : détection hétérodyne \Rightarrow bruit blanc de fréquenceTension de sortie V_{DS} de la détection synchrone :

$$V_{DS} = -2k_d P_{inj} K_{DS} \phi_m \frac{4Q_0 \beta_1}{v_0 (1 + \beta_1 + \beta_2)^2} (v_{osc} - v_0) = D \times K_{DS} \times (v_{osc} - v_0)$$

Le détecteur de Pound : principe

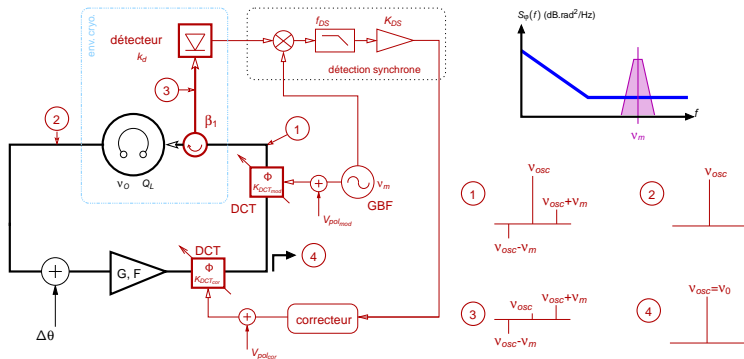
Détecteur de Pound : détection hétérodyne \Rightarrow **bruit blanc de fréquence**



Tension de sortie V_{DS} de la détection synchrone :

$$V_{DS} = -2k_d P_{inj} K_{DS} \phi_m \frac{4Q_0 \beta_1}{v_0 (1 + \beta_1 + \beta_2)^2} (v_{osc} - v_0) = D \times K_{DS} \times (v_{osc} - v_0)$$

Le détecteur de Pound : principe

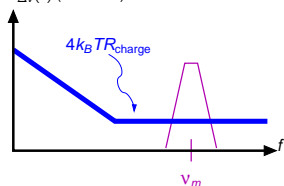
Détecteur de Pound : détection hétérodyne \Rightarrow bruit blanc de fréquenceTension de sortie V_{DS} de la détection synchrone :

$$V_{DS} = -2k_d P_{inj} K_{DS} \phi_m \frac{4Q_0 \beta_1}{v_0 (1 + \beta_1 + \beta_2)^2} (v_{osc} - v_0) = D \times K_{DS} \times (v_{osc} - v_0)$$

Quelle est la limite du détecteur de Pound ?

Le détecteur de Pound : limite

Bruit de tension du détecteur quadratique

 $S_{\Delta v}(f)$ (dB.V²/Hz)

$$\Delta V_{DS} = D \times K_{DS} \times \Delta v$$

avec

$$D = -2k_d P_{inj} K_{DS} \phi_m \frac{4Q_0 \beta_1}{v_0 (1 + \beta_1 + \beta_2)^2}$$

avec les valeurs typiques $\Rightarrow |D| = 18,7$ mV/Hz.

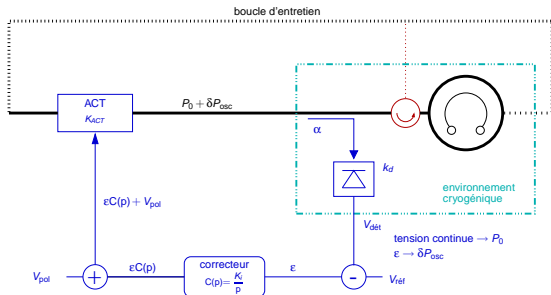
En considérant le bruit du détecteur $S_{\Delta v}^{R_{charge}}(f) \approx -166$ dB.V²/Hz dominant en entrée de la DS :

$$\sigma_{Y_{limite}}^{Pound}(\tau) = \sqrt{\frac{S_{\Delta v}^{R_{charge}}(f)}{2v_0 D^2 \tau}} \approx 2 \times 10^{-17} \tau^{-1/2}$$

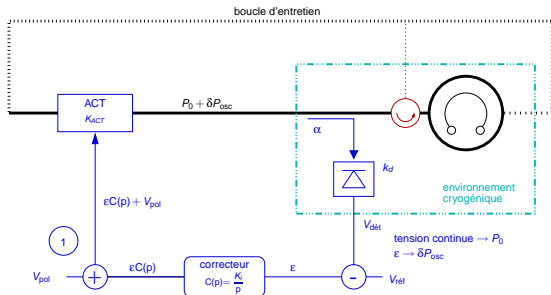
D'autres paramètres à considérer :

- bruit de la DS
- bruit de phase du circulateur et DCT
- repliement spectral
- modulation d'amplitude résiduelle
- $S_{\alpha}(f)$ de diode tunnel à 4,2 K

Le contrôle de puissance : principe



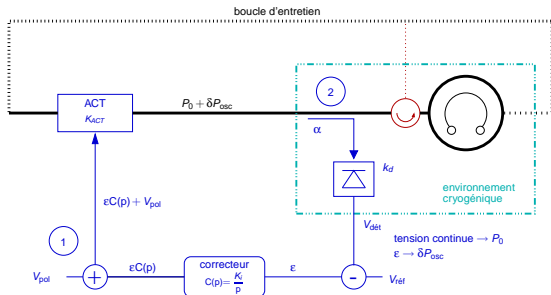
Le contrôle de puissance : principe



1

en boucle ouverte,
polarisation de l'ACT de gain K_{ACT}
 $\Rightarrow P_0 \leq 0$ dBm

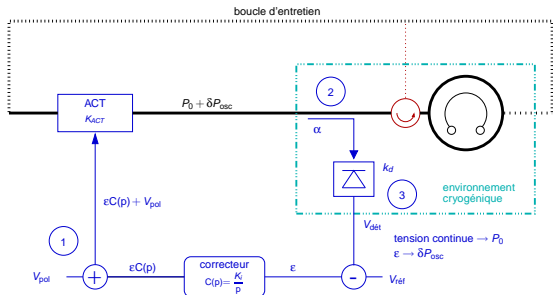
Le contrôle de puissance : principe



1 en boucle ouverte, polarisation de l'ACT de gain K_{ACT}
 $\Rightarrow P_0 \leq 0$ dBm

2 coupler directionnel α au plus près de la cellule résonante
 \Rightarrow image fidèle de δP_{osc}

Le contrôle de puissance : principe

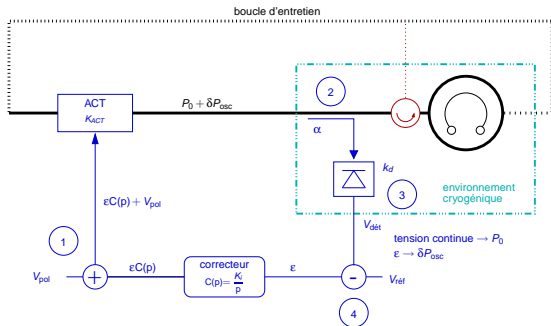


1 en boucle ouverte, polarisation de l'ACT de gain K_{ACT}
 $\Rightarrow P_0 \leq 0$ dBm

2 coupleur directionnel α au plus près de la cellule résonante
 \Rightarrow image fidèle de δP_{osc}

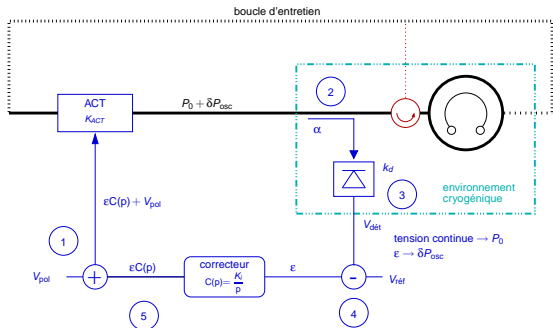
3 diode de détection k_d
 \Rightarrow signal d'erreur

Le contrôle de puissance : principe



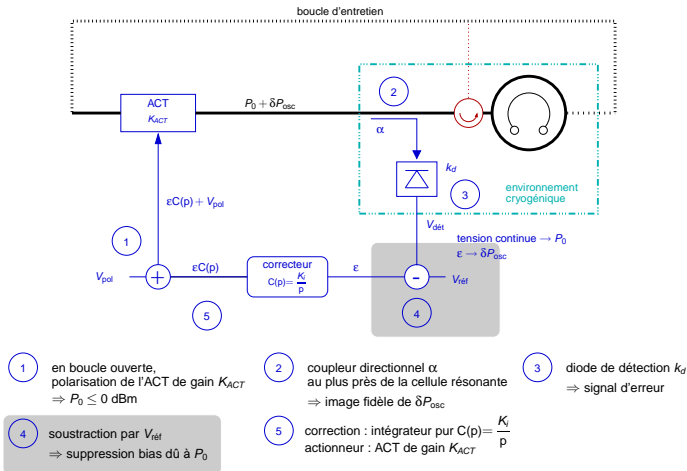
- 1 en boucle ouverte, polarisation de l'ACT de gain K_{ACT}
 $\Rightarrow P_0 \leq 0$ dBm
- 2 coupleur directionnel α au plus près de la cellule résonante
 \Rightarrow image fidèle de δP_{osc}
- 3 diode de détection k_d
 \Rightarrow signal d'erreur
- 4 soustraction par V_{ref}
 \Rightarrow suppression bias dû à P_0

Le contrôle de puissance : principe



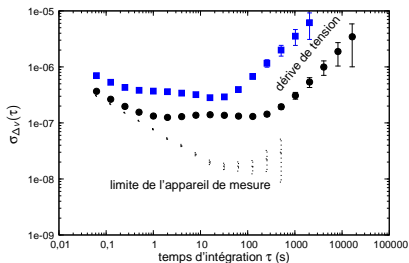
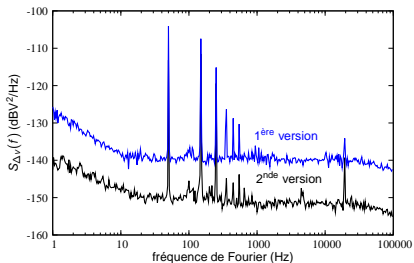
- 1 en boucle ouverte, polarisation de l'ACT de gain K_{ACT}
 $\Rightarrow P_0 \leq 0$ dBm
- 2 coupleur directionnel α au plus près de la cellule résonante
 \Rightarrow image fidèle de δP_{osc}
- 3 diode de détection k_d
 \Rightarrow signal d'erreur
- 4 soustraction par V_{ref}
 \Rightarrow suppression biais dû à P_0
- 5 correction : intégrateur pur $C(p) = \frac{K_I}{p}$
 actionneur : ACT de gain K_{ACT}

Le contrôle de puissance : principe

**Important de minimiser le bruit de l'électronique BF**

- \Rightarrow mesure de bruit de tension de l'électronique pour déterminer limite court terme
- \Rightarrow mesure de la stabilité de tension de l'électronique pour déterminer limite long terme

Le contrôle de puissance : limite



$$\text{palier flicker } \sigma_{\text{limite}}^{\text{Puissance}} = \Gamma \sqrt{2 \ln 2 S_{\Delta v}(1 \text{ Hz}) \left(\frac{(1-\alpha)}{\alpha K_d K_{c2}} \right)^2}$$

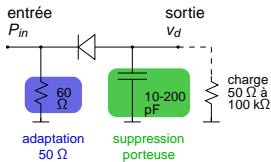
$$\text{dérive de fréquence } \sigma_{\text{limite}}^{\text{Puissance}}(1 \text{ jour}) = \sigma_{\Delta v}(1 \text{ jour}) \frac{(1-\alpha)}{\alpha K_d K_{c2}} \Gamma$$

versions	palier flicker	dérive de fréquence	$\Delta P/P$
première	1×10^{-15}	$7 \times 10^{-14}/\text{jour}$	$2,5 \times 10^{-4}$
seconde	$3,5 \times 10^{-16}$	$6 \times 10^{-15}/\text{jour}$	$8,7 \times 10^{-5}$



$$\text{Objectif atteint : } \frac{\Delta P}{P} \leq 7,5 \times 10^{-4}$$

Les détecteurs quadratiques : généralités

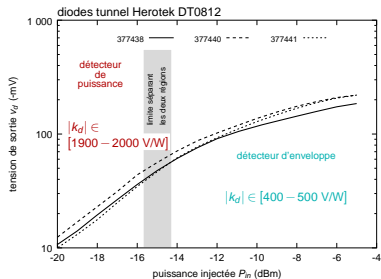


Fonction de transfert :

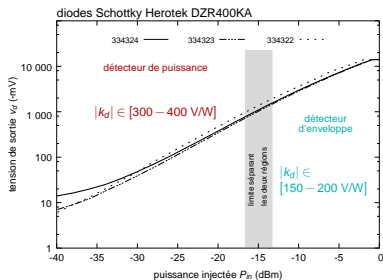
$$v_d = k_d P_{in} \quad \text{avec } k_d \text{ en V/W}$$

Adaptation 50 Ω Suppression de la porteuse

Deux types de détecteur quadratique seront utilisés :



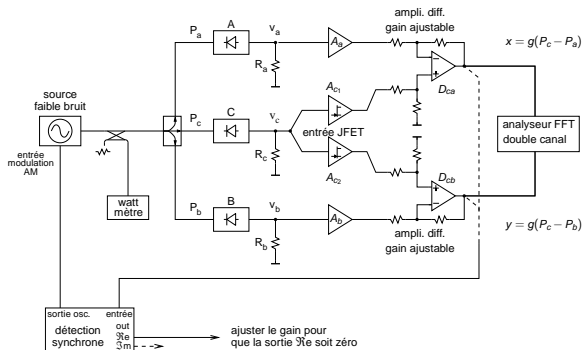
⇒ capteur contrôle électronique



⇒ mesure bruit d'amplitude

Les détecteurs quadratiques : banc de mesure de bruit d'amplitude

La mesure du bruit d'amplitude des diodes de détection \Rightarrow limite de stabilité du CSO

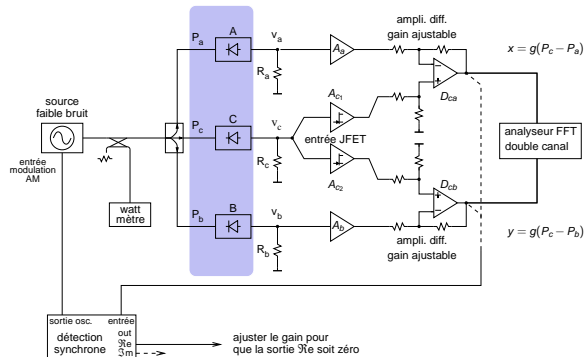


Utilisation de la cross-corrélation :

- supprimer le bruit de la source par ajustement de C-A et C-B
- ampli. JFET \Rightarrow décorrélation A_{C1} et A_{C2}
- diodes A et B indépendantes \Rightarrow réjection du bruit par moyennage
- **mesure du bruit AM de la diode de détection centrale uniquement**

Les détecteurs quadratiques : banc de mesure de bruit d'amplitude

La mesure du bruit d'amplitude des diodes de détection \Rightarrow limite de stabilité du CSO



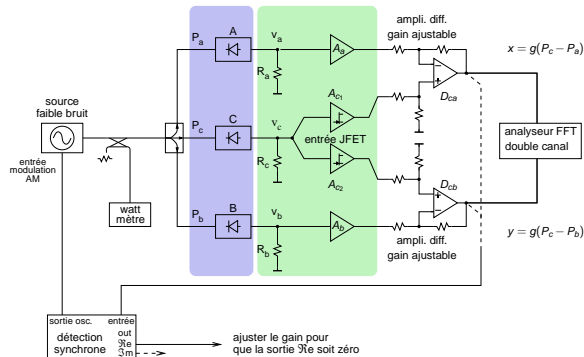
Détecteurs : diodes Schottky
Herotek DZR400KA

Utilisation de la cross-corrélation :

- supprimer le bruit de la source par ajustement de C-A et C-B
- ampli. JFET \Rightarrow décorrélation A_{C1} et A_{C2}
- diodes A et B indépendantes \Rightarrow réjection du bruit par moyennage
- **mesure du bruit AM de la diode de détection centrale uniquement**

Les détecteurs quadratiques : banc de mesure de bruit d'amplitude

La mesure du bruit d'amplitude des diodes de détection \Rightarrow limite de stabilité du CSO



Détecteurs : diodes Schottky
Herotek DZR400KA

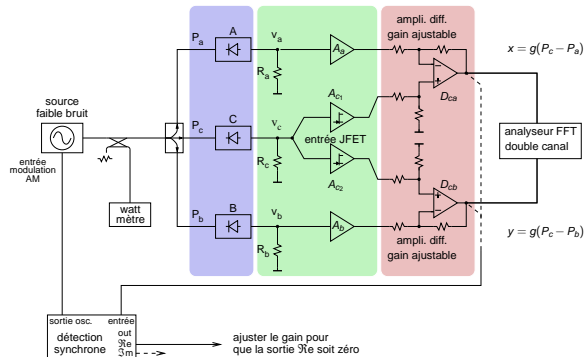
Ampli. : AOP AD743
(faible bruit de courant)

Utilisation de la cross-corrélation :

- supprimer le bruit de la source par ajustement de C-A et C-B
- ampli. JFET \Rightarrow décorrélation A_{c1} et A_{c2}
- diodes A et B indépendantes \Rightarrow réjection du bruit par moyennage
- **mesure du bruit AM de la diode de détection centrale uniquement**

Les détecteurs quadratiques : banc de mesure de bruit d'amplitude

La mesure du bruit d'amplitude des diodes de détection \Rightarrow limite de stabilité du CSO



Détecteurs : diodes Schottky
Herotek DZR400KA

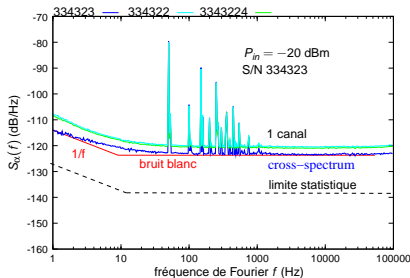
Ampli. : AOP AD743
(faible bruit de courant)

Ampli. diff. : OP270
(AOP faible bruit)

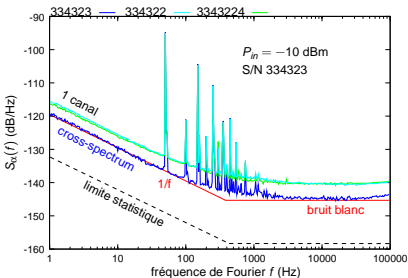
Utilisation de la cross-corrélation :

- supprimer le bruit de la source par ajustement de C-A et C-B
- ampli. JFET \Rightarrow décorrélation A_{c1} et A_{c2}
- diodes A et B indépendantes \Rightarrow réjection du bruit par moyennage
- **mesure du bruit AM de la diode de détection centrale uniquement**

Les détecteurs quadratiques : résultats de la mesure de bruit d'amplitude



détecteur de puissance
 $k_{-1} = -115$ dB/Hz@1Hz



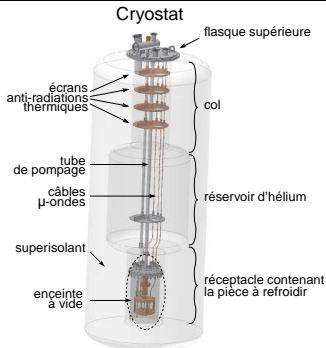
détecteur d'enveloppe
 $k_{-1} = -120$ dB/Hz@1Hz

≠

Conclusion

- résultats identiques en régime "détecteur de puissance" : $k_{-1} = -115$ dB/Hz@1Hz
- différence de 5 dB en régime "détecteur d'enveloppe" mais absence de ce régime pour la diode S/N 334321

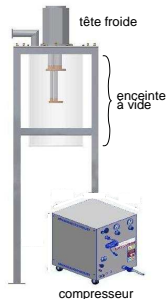
Les technologies cryogéniques



- Avantages d'un cryostat :
exempt de vibrations mécaniques
environnement cryo. uniforme
- Inconvénient d'un cryostat :
faible autonomie (3 semaines)

Cryostat : solution idéale pour la validation du design de nos CSO

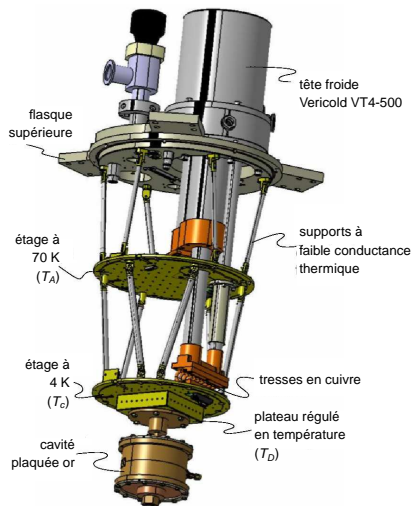
Cryogénérateur



- Avantage d'un cryogénérateur :
longue autonomie (2 ans)
- Inconvénients d'un cryogénérateur :
source de vibrations et de fluctuations thermiques

Cryogénérateur : solution idéale pour l'ESA
mais ...

Le cryogénérateur à faibles vibrations



Developpement d'un prototype incorporant des filtrages mécanique et thermique

Au départ : conception du cryogénérateur par le NPL mais **solution commerciale**

Au final : élaboration du cahier des charges

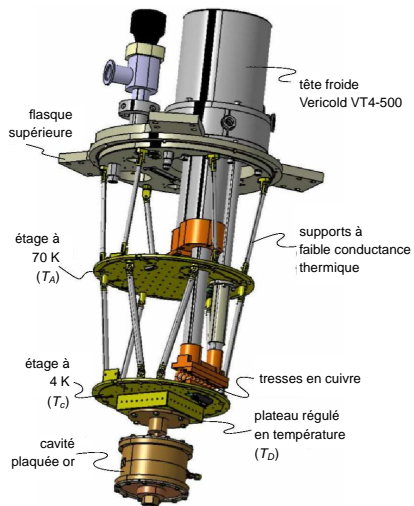
$$Z_0 \leq 2,3 \mu\text{m}$$

$$\Delta T \leq 1 \text{ mK}$$

Prototype conçu par Oxford Instruments

Le cryogénérateur à faibles vibrations

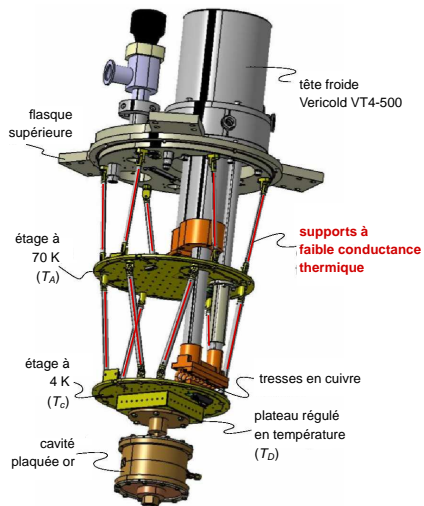
Filtrage des vibrations mécaniques



Visite chez Oxford Instruments pour effectuer les tests. Réception du cryogénérateur à FEMTO-ST.

Le cryogénérateur à faibles vibrations

Filtrage des vibrations mécaniques



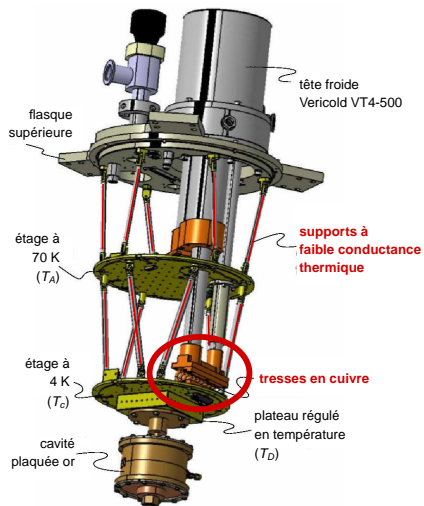
Visite chez Oxford Instruments pour effectuer les tests. Réception du cryogénérateur à FEMTO-ST.

Filtrage mécanique :

- orientation des supports

Le cryogénérateur à faibles vibrations

Filtrage des vibrations mécaniques



Visite chez Oxford Instruments pour effectuer les tests. Réception du cryogénérateur à FEMTO-ST.

Filtrage mécanique :

- orientation des supports
- tresses de cuivres

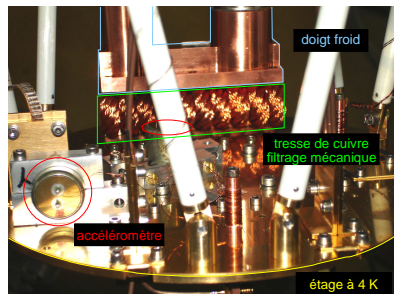
Le cryogénérateur à faibles vibrations

Filtrage des vibrations mécaniques

Visite chez Oxford Instruments pour effectuer les tests. Réception du cryogénérateur à FEMTO-ST.

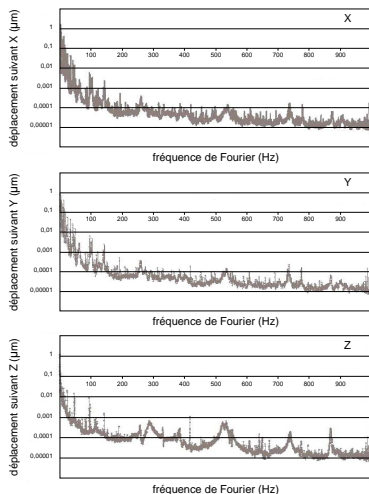
Filtrage mécanique :

- orientation des supports
- tresses de cuivres



Le cryogénérateur à faibles vibrations

Filtrage des vibrations mécaniques



Visite chez Oxford Instruments pour effectuer les tests. Réception du cryogénérateur à FEMTO-ST.

Filtrage mécanique :

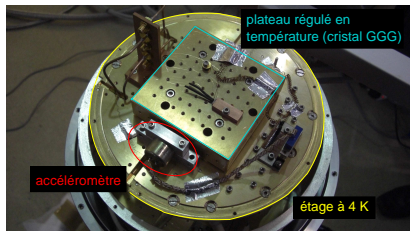
- orientation des supports
- tresses de cuivres



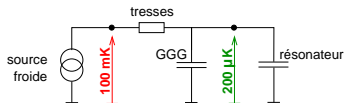
Déplacement résiduel $< 1 \mu\text{m}$ suivant X, Y, Z

Le cryogénérateur à faibles vibrations

Filtrage thermique



matériaux	c $J.g^{-1}.K^{-1}$	λ $W.cm^{-1}.K^{-1}$
Cuivre	$2,4 \times 10^{-4}$	2,8
Inox	$2,9 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$
GGG	$1,5 \times 10^{-3}$	4



Visite chez Oxford Instruments pour effectuer les tests. Réception du cryogénérateur à FEMTO-ST.

Filtrage mécanique :

- orientation des supports
- tresses de cuivres



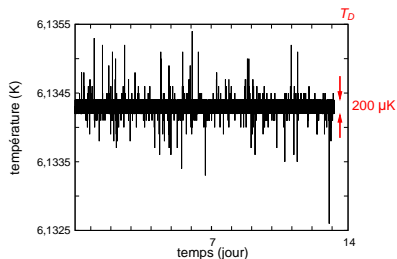
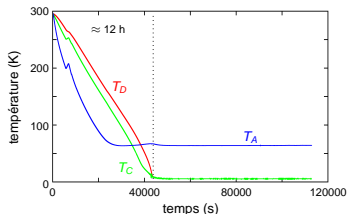
Déplacement résiduel <1 µm suivant X, Y, Z

Filtrage thermique :

- matériaux des supports
- cristal Gadolinium Gallium Garnet (GGG)

Le cryogénérateur à faibles vibrations

Filtrage des vibrations mécaniques



Visite chez Oxford Instruments pour effectuer les tests. Réception du cryogénérateur à FEMTO-ST.

Filtrage mécanique :

- orientation des supports
- tresses de cuivres



Déplacement résiduel $< 1 \mu\text{m}$ suivant X, Y, Z

Filtrage thermique :

- matériaux des supports
- cristal Gadolinium Gallium Garnet (GGG)



Fluctuations résiduelles de $T^\circ < 1 \text{ mK}$

Récapitulatifs

Tableau récapitulatif

$Q_L \geq 350 \times 10^6$	$Z_0 \leq 2,3 \mu\text{m}$	$\Delta T \leq 1\text{mK}$	$\Delta P/P \leq 7,5 \times 10^{-4}$	$\beta_1 \approx 1 @ T_0$
OK	OK	OK	OK	OK

Tous les objectifs fixés à partir de la théorie sont atteints.

Récapitulatifs

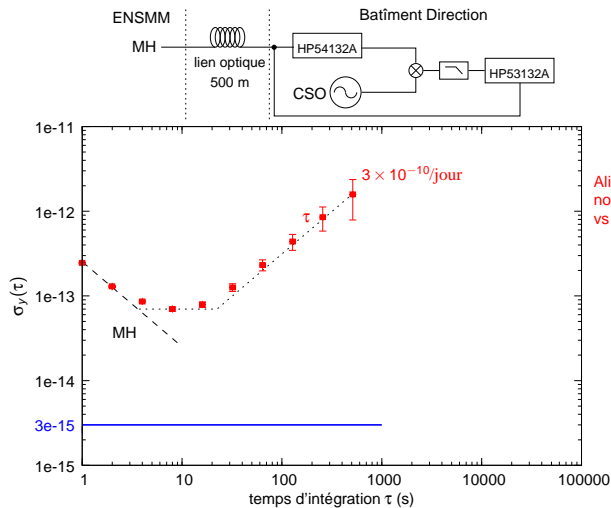
Tableau récapitulatif

$Q_L \geq 350 \times 10^6$	$Z_0 \leq 2,3 \mu\text{m}$	$\Delta T \leq 1\text{mK}$	$\Delta P/P \leq 7,5 \times 10^{-4}$	$\beta_1 \approx 1 @ T_0$
OK	OK	OK	OK	OK

Tous les objectifs fixés à partir de la théorie sont atteints.

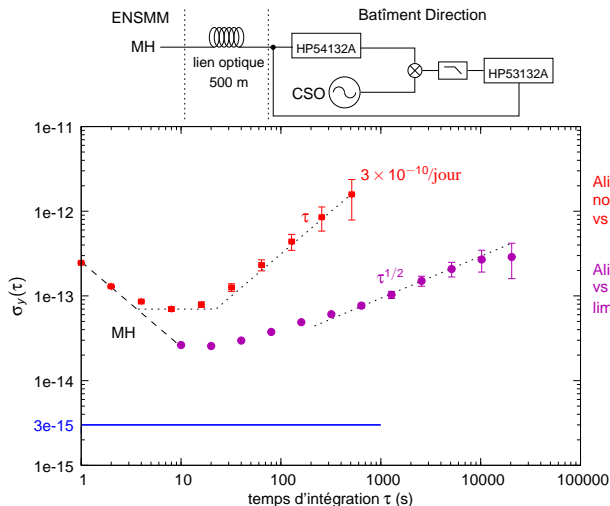
Maintenant à nous les 3×10^{-15} !!!

Résultats préliminaires



Alizée cryogénérateur
non-filtré ($\Delta T = 100$ mK)
vs MH (2008)

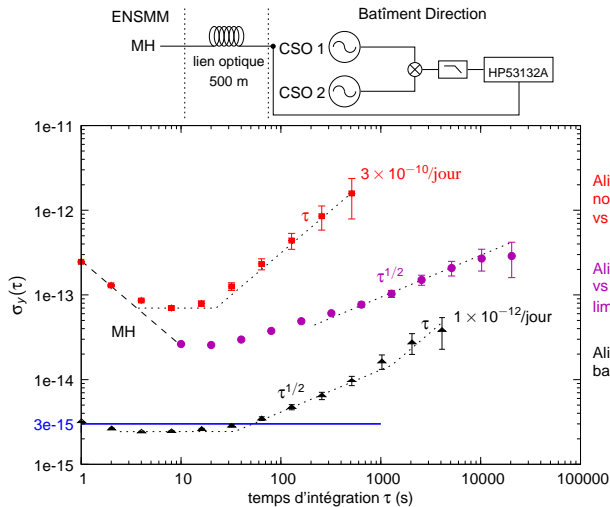
Résultats préliminaires



Alizée cryogénérateur
non-filtré ($\Delta T = 100$ mK)
vs MH (2008)

Alizée bain d'He liq.
vs MH (2008)
limitation lien optique

Résultats préliminaires

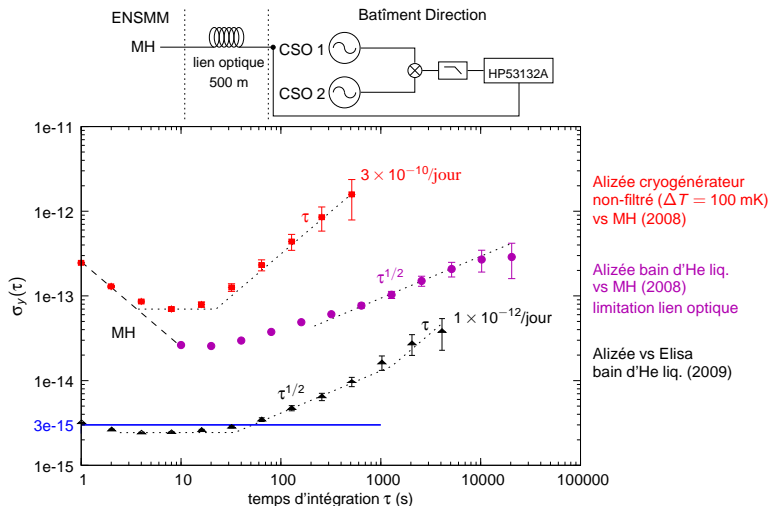


Alizée cryogénérateur
non-filtré ($\Delta T = 100$ mK)
vs MH (2008)

Alizée bain d'He liq.
vs MH (2008)
limitation lien optique

Alizée vs Elisa
bain d'He liq. (2009)

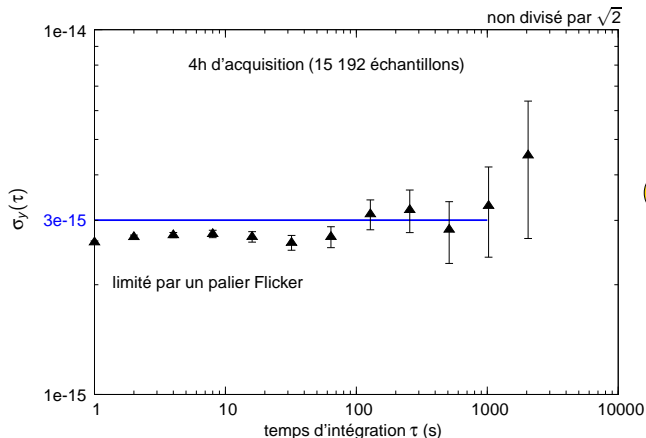
Résultats préliminaires



Validation "design" des CSO mais limitation pour $\tau > 32$ s

Elisa en cryogénérateur vs Alizée en cryostat

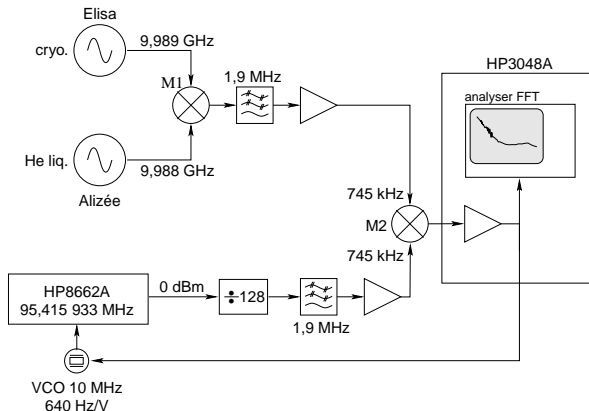
résonateur	techno.	mode	ν_0 GHz	S_{21} dB	S_{11} dB	Q_L	β_1
Elisa	cryo. Ol	$WGH_{15,0,0}^-$	9,989 120	-24,7	-29	757×10^6	1
Alizée	He liq.	$WGH_{15,0,0}^-$	9,988 369	-25,3	-25,4	686×10^6	1,15



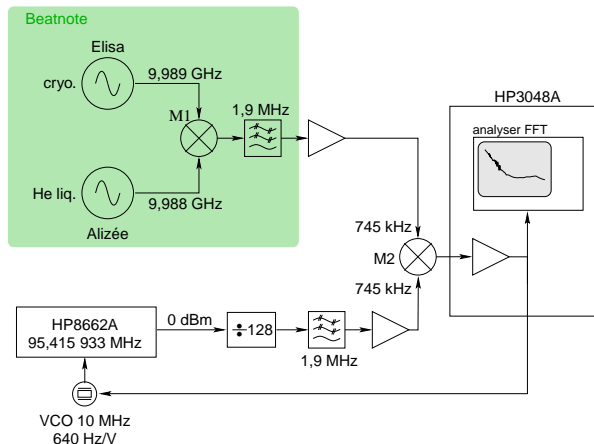
Objectif atteint

$$\Rightarrow \sigma_y(\tau) \approx 3 \times 10^{-15} \text{ pour } \tau \in [1 - 1000 \text{ s}]$$

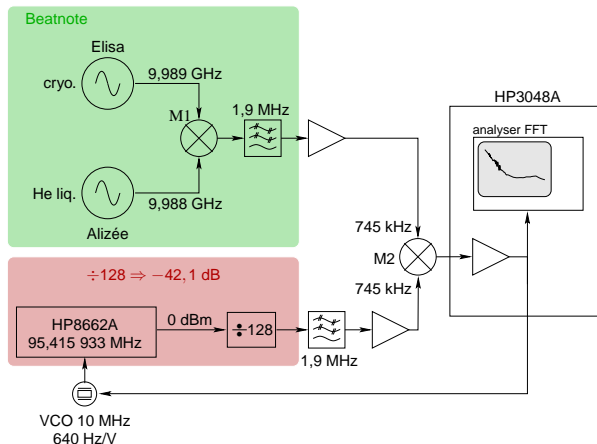
Principe mesure bruit de phase



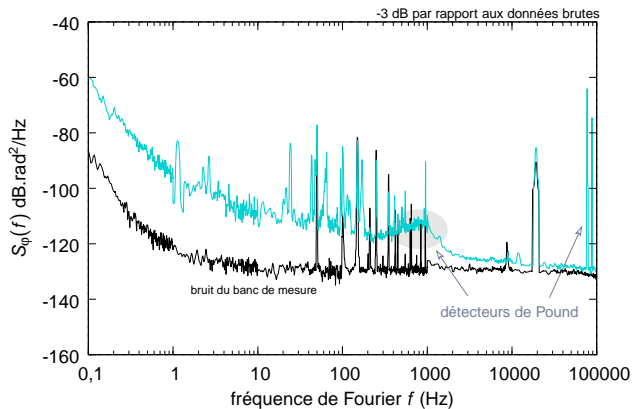
Principe mesure bruit de phase



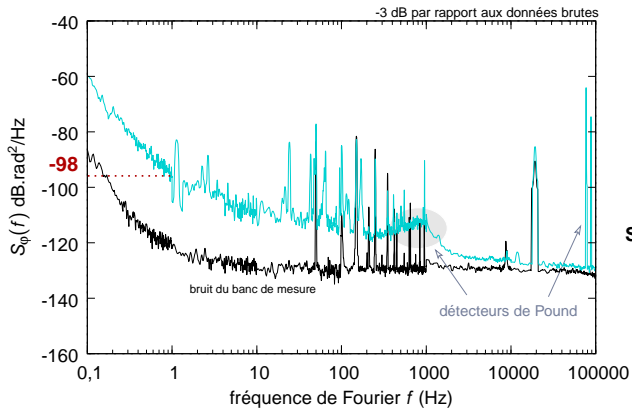
Principe mesure bruit de phase



Bruit de phase d'un CSO



Bruit de phase d'un CSO

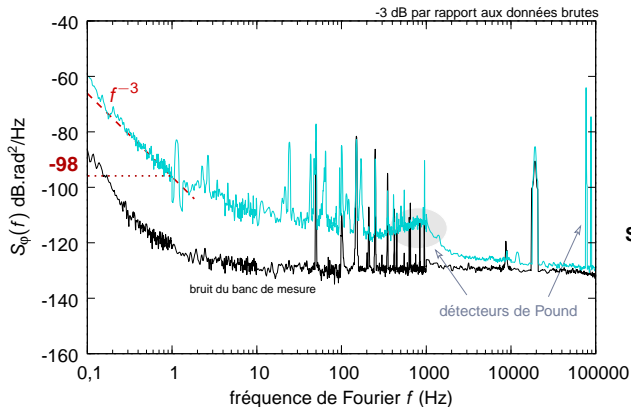


Objectif atteint



$$S_{\phi}(1 \text{ Hz}) \leq -93 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

Bruit de phase d'un CSO



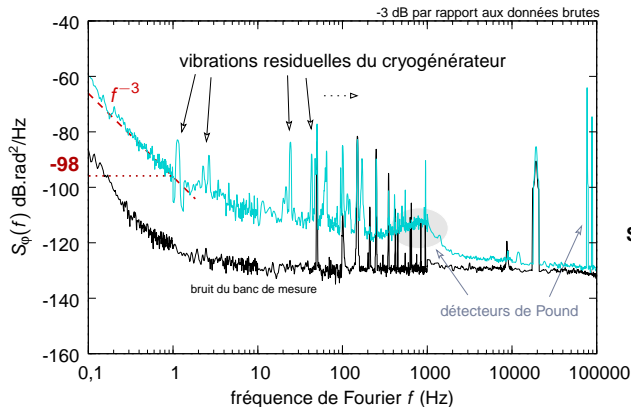
Objectif atteint

⇒

$$S_{\phi}(1 \text{ Hz}) \leq -93 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1 \text{ s}) = 1,5 \times 10^{-15} \sim \sigma_y^{\text{mesurée}}(1 \text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$

Bruit de phase d'un CSO



Objectif atteint



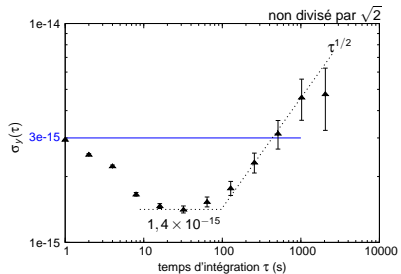
$$S_{\phi}(1 \text{ Hz}) \leq -93 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1 \text{ s}) = 1,5 \times 10^{-15} \sim \sigma_y^{\text{mesurée}}(1 \text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$

Estimation déplacement résiduel à partir du 1er pic à 1,14 Hz : $Z_0 < 1 \mu\text{m}_{\text{RMS}}$

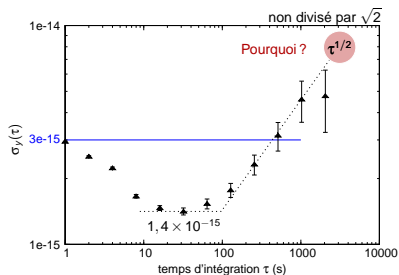
Amélioration de la stabilité

Nouveaux réglages des détecteurs de Pound



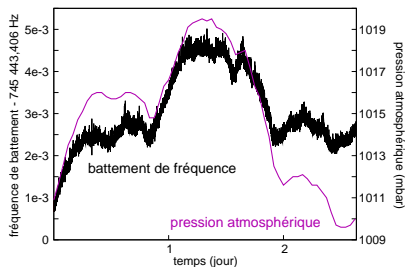
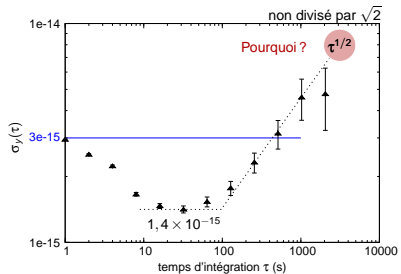
Amélioration de la stabilité

Nouveaux réglages des détecteurs de Pound

Pourquoi limitation par une marche aléatoire pour $\tau > 100$ s ?

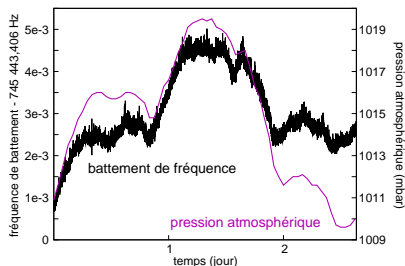
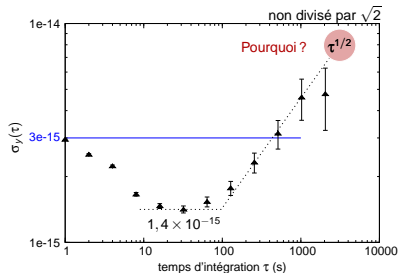
Amélioration de la stabilité

Nouveaux réglages des détecteurs de Pound

Pourquoi limitation par une marche aléatoire pour $\tau > 100$ s ?

Amélioration de la stabilité

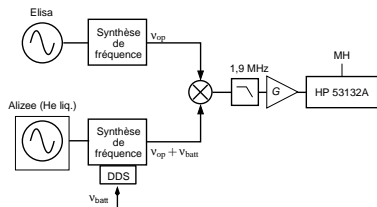
Nouveaux réglages des détecteurs de Pound

Pourquoi limitation par une marche aléatoire pour $\tau > 100$ s ?

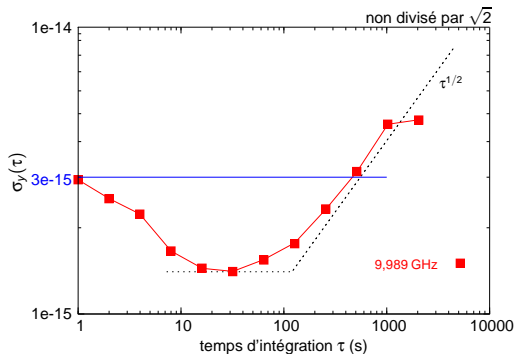
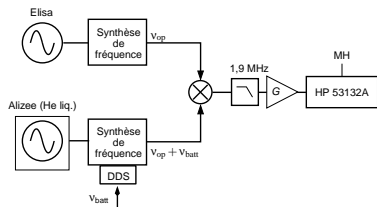
Limitation due à l'utilisation d'hélium liquide

$$\frac{1}{P_{\text{atm}}} \frac{\Delta v}{v_0} \approx 7 \times 10^{-14} \text{ mbar}^{-1} \Rightarrow \sim 10^{-13} \text{ à la journée}$$

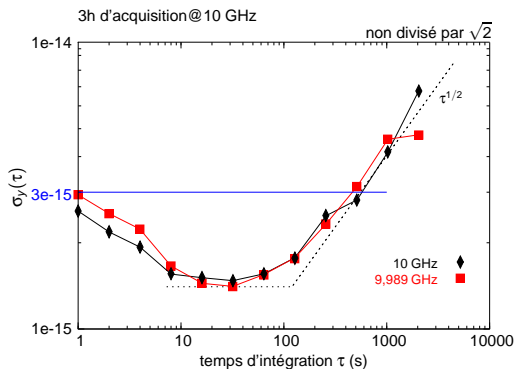
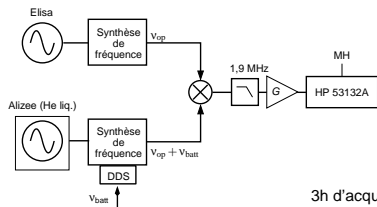
Stabilité de fréquence des sorties 10 GHz et 100 MHz



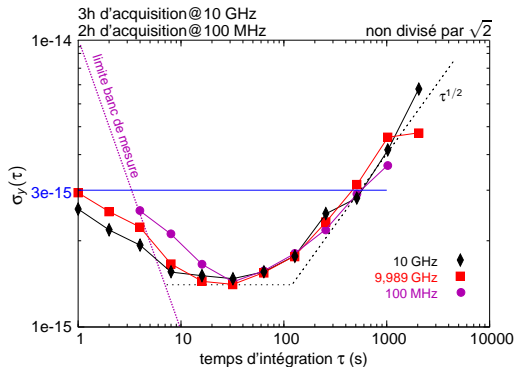
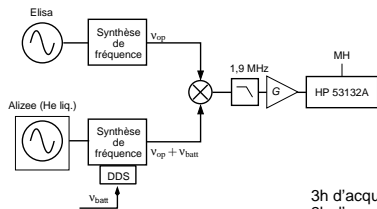
Stabilité de fréquence des sorties 10 GHz et 100 MHz



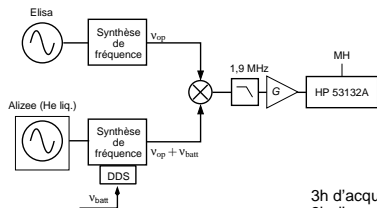
Stabilité de fréquence des sorties 10 GHz et 100 MHz



Stabilité de fréquence des sorties 10 GHz et 100 MHz

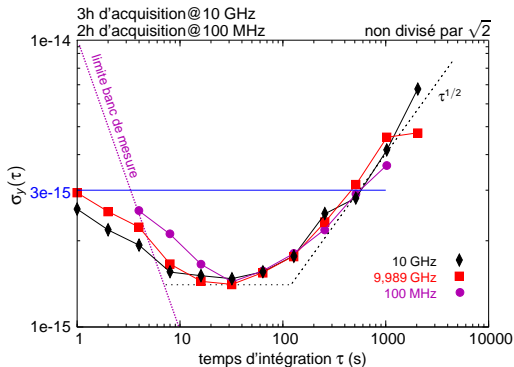


Stabilité de fréquence des sorties 10 GHz et 100 MHz

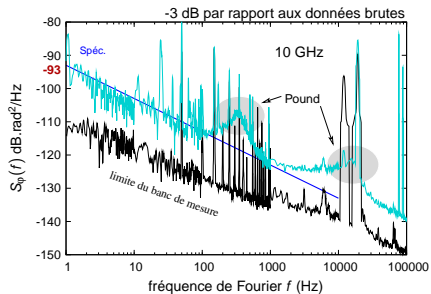


Objectif atteint

**Transfert de la stabilité
à 10 GHz et 100 MHz**



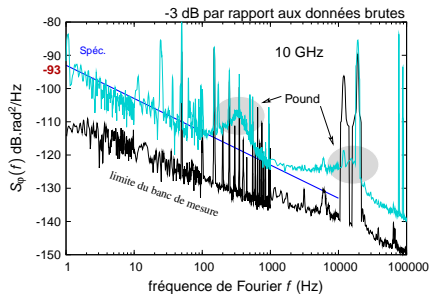
Bruit de phase des sorties 10 GHz et 100 MHz



Bruit de phase des sorties 10 GHz et 100 MHz

$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1 \text{ s}) = 2,2 \times 10^{-15} \sim$$

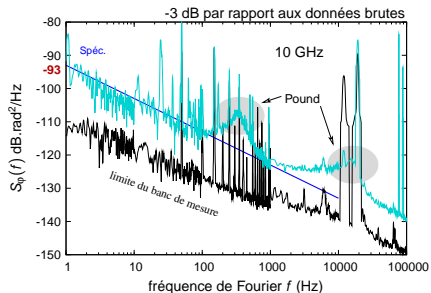
$$\sigma_y^{\text{mesurée}}(1 \text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$



Bruit de phase des sorties 10 GHz et 100 MHz

$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1 \text{ s}) = 2,2 \times 10^{-15} \sim$$

$$\sigma_y^{\text{mesurée}}(1 \text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$



Objectif atteint

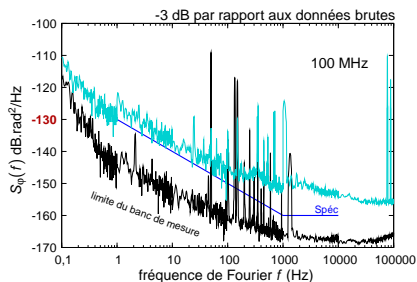
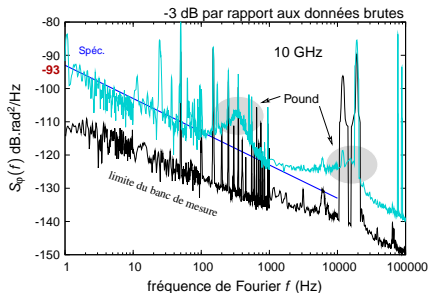
⇒

$$S_\phi(1 \text{ Hz}) \leq -93 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

Bruit de phase des sorties 10 GHz et 100 MHz

$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1 \text{ s}) = 2,2 \times 10^{-15} \sim$$

$$\sigma_y^{\text{mesurée}}(1 \text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$



Objectif atteint

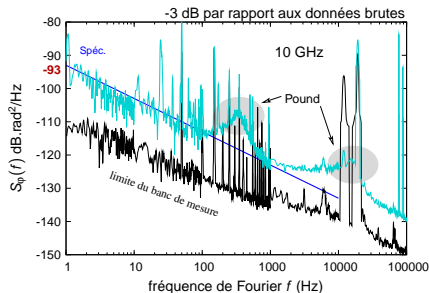


$$S_\phi(1 \text{ Hz}) \leq -93 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

Bruit de phase des sorties 10 GHz et 100 MHz

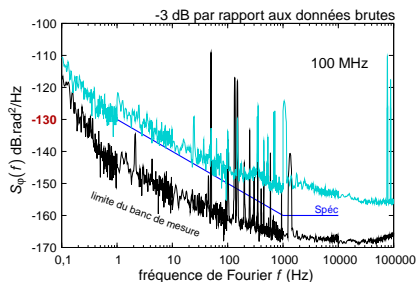
$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1\text{ s}) = 2,2 \times 10^{-15} \sim$$

$$\sigma_y^{\text{mesurée}}(1\text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$



$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1\text{ s}) = 3,2 \times 10^{-15} >$$

$$\sigma_y^{\text{mesurée}}(1\text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$



Objectif atteint

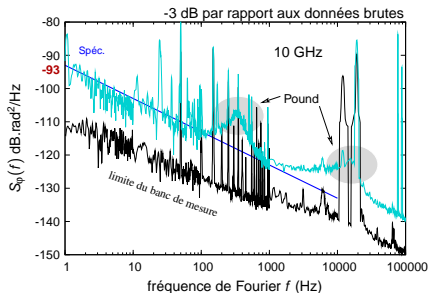


$$S_\phi(1\text{ Hz}) \leq -93\text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

Bruit de phase des sorties 10 GHz et 100 MHz

$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1\text{ s}) = 2,2 \times 10^{-15} \sim$$

$$\sigma_y^{\text{mesurée}}(1\text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$

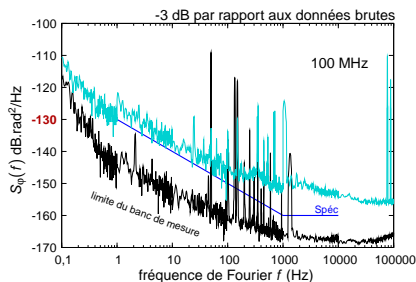


Objectif atteint

$$\Rightarrow S_\phi(1\text{ Hz}) \leq -93\text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

$$\sigma_y^{\text{convertie}}(1\text{ s}) = 3,2 \times 10^{-15} >$$

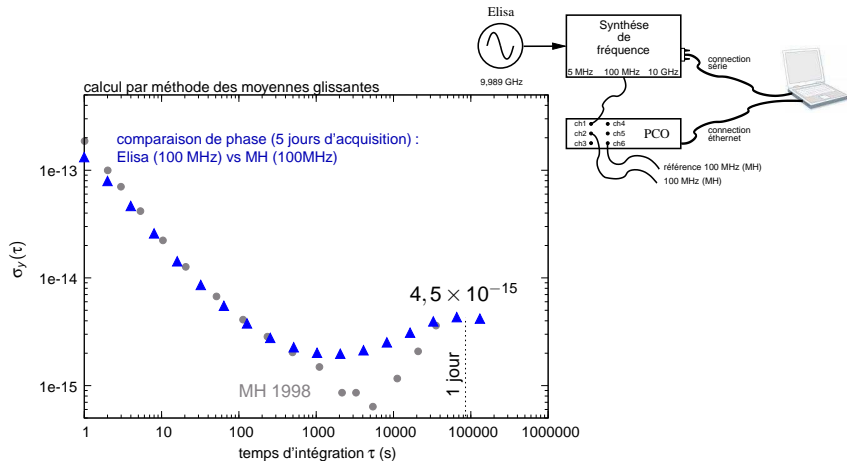
$$\sigma_y^{\text{mesurée}}(1\text{ s}) = \frac{2,6 \times 10^{-15}}{\sqrt{2}} = 1,8 \times 10^{-15}$$



Objectif atteint

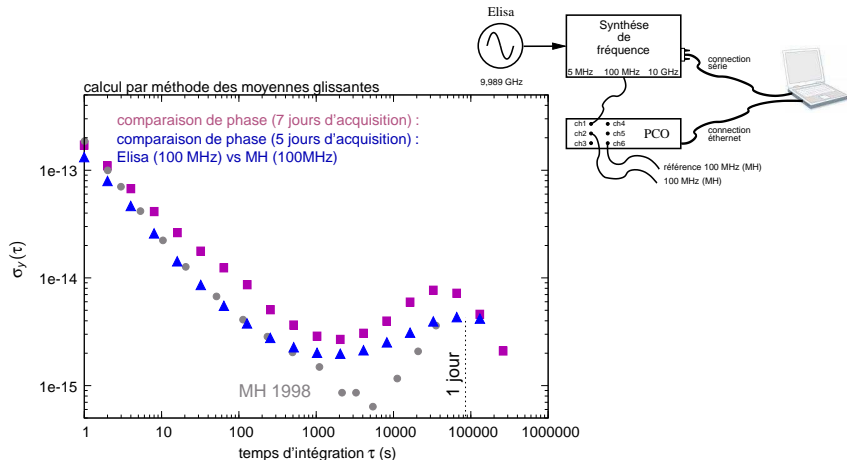
$$\Rightarrow S_\phi(1\text{ Hz}) \leq -130\text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$$

Stabilité long terme



Etat-de-l'art pour oscillateur à résonateur macroscopique :
4,5 × 10⁻¹⁵ à la journée, possible limitation par MH !

Stabilité long terme



Etat-de-l'art pour oscillateur à résonateur macroscopique :
 $4,5 \times 10^{-15}$ à la journée, possible limitation par MH !

Conclusion

L'oscillateur saphir cryogénique :

- $\sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$ pour $\tau \in [1 - 1\ 000\ \text{s}]$
- $S_\phi(1\ \text{Hz}) = -98\ \text{dB.rad}^2/\text{Hz}@1\ \text{Hz}$
- $\sigma_y(1\ \text{jour}) \approx 4,5 \times 10^{-15}$

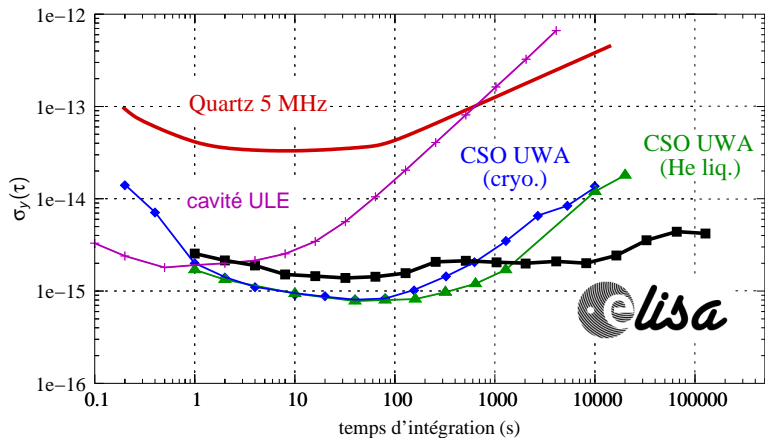
Les objectifs de l'ESA ont tous été atteints

La chaîne de synthèse :

- $\sigma_y^{10\ \text{GHz}}(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$ pour $\tau \in [1 - 1\ 000\ \text{s}]$
- $\sigma_y^{100\ \text{MHz}}(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$ pour $\tau \in [4 - 1\ 000\ \text{s}]$
- $S_\phi^{10\ \text{GHz}}(1\ \text{Hz}) = -93\ \text{dB.rad}^2/\text{Hz}@1\ \text{Hz}$
- $S_\phi^{100\ \text{MHz}}(1\ \text{Hz}) = -130\ \text{dB.rad}^2/\text{Hz}@1\ \text{Hz}$

Les objectifs de l'ESA ont tous été atteints

Conclusion



Perspectives

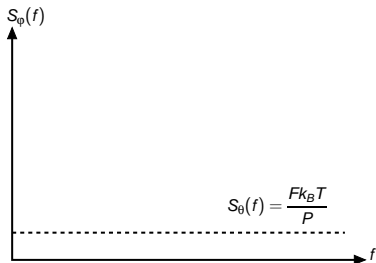
Applications :

- Deep Space Network ground station (DSN)
- Very Long Baseline Interferometry (VLBI)
- oscillateur local pour fontaine atomique
- expérience de physique fondamentale ...

Perspectives :

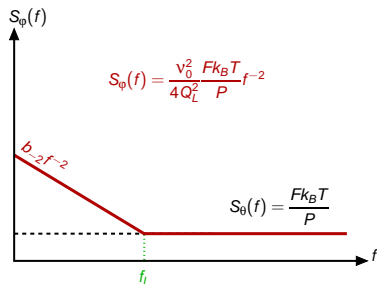
- comparaison de deux CSOs incorporants un cryogénérateur \Rightarrow mesurer la stabilité réelle d'Elisa
- mesure de $S_{\alpha(f)}$ de diodes tunnels refroidies à 4,2 K
- déterminer la limite des contrôles électroniques
- numérisation des contrôles électroniques (multivariables)
- possible industrialisation ...

L'amplificateur : limite court terme



k_B : cste de Boltzmann P : puissance d'entrée ampli.
 T : temprature ambiante b_{-1} : -100 à -120 dB.rad²/Hz

L'amplificateur : limite court terme

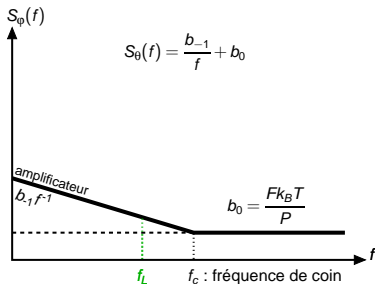


k_B : cste de Boltzmann P : puissance d'entrée ampli.
 T : temprature ambiante b_{-1} : -100 à -120 dB.rad²/Hz

$$\text{Bruit thermique} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{\frac{Fk_B T}{2P} \frac{1}{\tau}}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-18} / \sqrt{\tau}$$

L'amplificateur : limite court terme

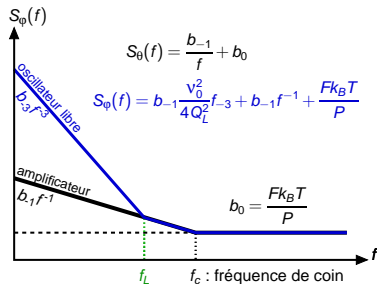


k_B : cste de Boltzmann P : puissance d'entrée ampli.
 T : temprature ambiante b_{-1} : -100 à -120 dB.rad²/Hz

$$\text{Bruit thermique} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{\frac{Fk_B T}{2P} \frac{1}{\tau}}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-18} / \sqrt{\tau}$$

L'amplificateur : limite court terme



k_B : cste de Boltzmann P : puissance d'entrée ampli.
 T : température ambiante b_{-1} : -100 à -120 dB.rad²/Hz

$$\text{Bruit thermique} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{\frac{Fk_B T}{2P} \frac{1}{\tau}}$$

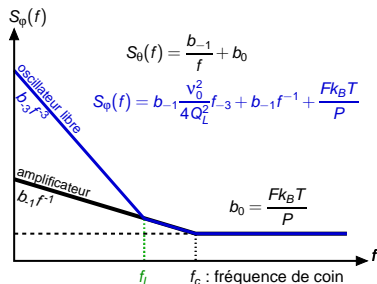
$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-18} / \sqrt{\tau}$$

$$\text{Bruit flicker} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{2 \ln 2} b_{-1}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-14}$$

supérieur à l'objectif principal

L'amplificateur : limite court terme



k_B : cste de Boltzmann P : puissance d'entrée ampli.
 T : température ambiante b_{-1} : -100 à -120 dB.rad²/Hz

$$\text{Bruit thermique} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{\frac{Fk_B T}{2P}} \frac{1}{\tau}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-18} / \sqrt{\tau}$$

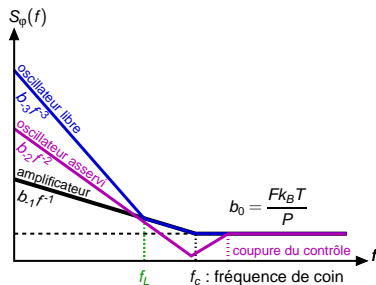
$$\text{Bruit flicker} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{2 \ln 2} b_{-1}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-14}$$

supérieur à l'objectif principal

Performance ultime \Rightarrow association d'électronique de contrôle pour corriger $\Delta\varphi$

L'amplificateur : limite court terme



k_B : cste de Boltzmann P : puissance d'entrée ampli.
 T : température ambiante b_{-1} : -100 à -120 dB.rad²/Hz

$$\text{Bruit thermique} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{\frac{Fk_B T}{2P} \frac{1}{\tau}}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-18} / \sqrt{\tau}$$

$$\text{Bruit flicker} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{2 \ln 2} b_{-1}$$

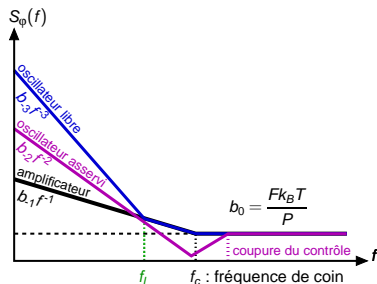
$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-14}$$

supérieur à l'objectif principal

Performance ultime \Rightarrow association d'électronique de contrôle pour corriger $\Delta\phi$

Dans ce cas, l'électronique limite la stabilité de fréquence court terme

L'amplificateur : limite court terme



k_B : cste de Boltzmann P : puissance d'entrée ampli.
 T : température ambiante b_{-1} : -100 à -120 dB.rad²/Hz

$$\text{Bruit thermique} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{\frac{Fk_B T}{2P}} \frac{1}{\tau}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-18} / \sqrt{\tau}$$

$$\text{Bruit flicker} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2Q_L} \sqrt{2 \ln 2} b_{-1}$$

$$\text{CSO} \Rightarrow \sigma_{y_{th}}(\tau) \approx 10^{-14}$$

supérieur à l'objectif principal

Performance ultime \Rightarrow association d'électronique de contrôle pour corriger $\Delta\phi$
 Dans ce cas, l'électronique limite la stabilité de fréquence court terme

"Line Splitting Factor" :

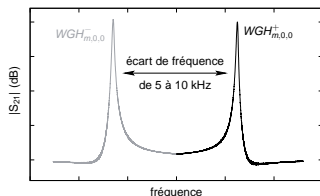
$$10^{-7} \leq \text{LSF} = Q_L \times \sigma_y(1 \text{ s}) \leq 10^{-6} \Rightarrow Q_L \geq 330 \times 10^6$$

Seul les résonateurs saphirs refroidis à 4,2 K permettent d'atteindre un tel Q_L

Dégénérescence des modes de résonances

La dégénérescence est levée lorsqu'une imperfection brise la symétrie cylindrique \Rightarrow résonances dédoublées, peut rendre impossible l'exploitation du mode désiré

Dégénérescence observable à T° cryogénique



$WGH_{m,0,0}$, résolution des éq. de Maxwell :

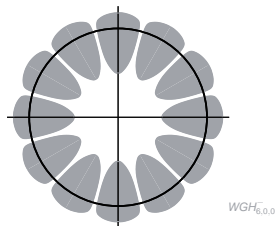
$$H_{\theta} \propto \begin{cases} \sin m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^{+} \\ \cos m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^{-} \end{cases}$$

Décalage de fréquence 5 à 10 kHz \Rightarrow impossible à observer à T° ambiante car $\delta\nu \in [50 - 100 \text{ kHz}]$

Besoin d'un refroidissement pour observer dégénérescence car $\delta\nu \in [10 - 100 \text{ Hz}]$

Dégénérescence des modes de résonances

La dégénérescence est levée lorsqu'une imperfection brise la symétrie cylindrique \Rightarrow résonances dédoublées, peut rendre impossible l'exploitation du mode désiré



$WGH_{m,0,0}$, résolution des éq. de Maxwell :

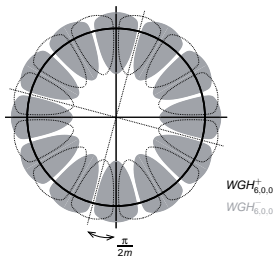
$$H_{\theta} \propto \begin{cases} \sin m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^+ \\ \cos m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^- \end{cases}$$

Décalage de fréquence 5 à 10 kHz \Rightarrow impossible à observer à T° ambiante car $\delta\nu \in [50 - 100 \text{ kHz}]$

Besoin d'un refroidissement pour observer dégénérescence car $\delta\nu \in [10 - 100 \text{ Hz}]$

Dégénérescence des modes de résonances

La dégénérescence est levée lorsqu'une imperfection brise la symétrie cylindrique \Rightarrow résonances dédoublées, peut rendre impossible l'exploitation du mode désiré



$WGH_{m,0,0}$, résolution des éq. de Maxwell :

$$H_{\theta} \propto \begin{cases} \sin m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^{+} \\ \cos m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^{-} \end{cases}$$

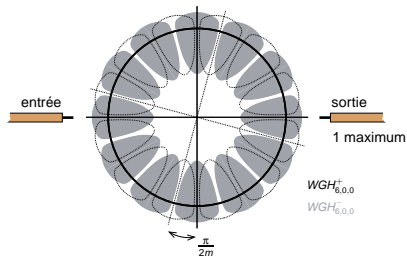
Décalage de fréquence 5 à 10 kHz \Rightarrow impossible à observer à T° ambiante car $\delta\nu \in [50 - 100 \text{ kHz}]$

Besoin d'un refroidissement pour observer dégénérescence car $\delta\nu \in [10 - 100 \text{ Hz}]$

Dégénérescence des modes de résonances

La dégénérescence est levée lorsqu'une imperfection brise la symétrie cylindrique \Rightarrow résonances dédoublées, peut rendre impossible l'exploitation du mode désiré

Cas idéal : sonde d'entrée \Rightarrow perturbation principale



$WGH_{m,0,0}$, résolution des éq. de Maxwell :

$$H_{\theta} \propto \begin{cases} \sin m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^+ \\ \cos m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^- \end{cases}$$

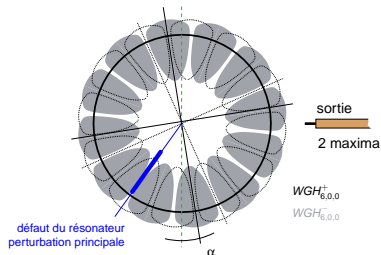
Décalage de fréquence 5 à 10 kHz \Rightarrow impossible à observer à T° ambiante car $\delta\nu \in [50 - 100 \text{ kHz}]$

Besoin d'un refroidissement pour observer dégénérescence car $\delta\nu \in [10 - 100 \text{ Hz}]$

Dégénérescence des modes de résonances

La dégénérescence est levée lorsqu'une imperfection brise la symétrie cylindrique \Rightarrow résonances dédoublées, peut rendre impossible l'exploitation du mode désiré

Cas réel : défauts du résonateur \Rightarrow perturbations principales



$WGH_{m,0,0}$, résolution des éq. de Maxwell :

$$H_{\theta} \propto \begin{cases} \sin m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^{+} \\ \cos m\theta \Rightarrow WGH_{m,0,0}^{-} \end{cases}$$

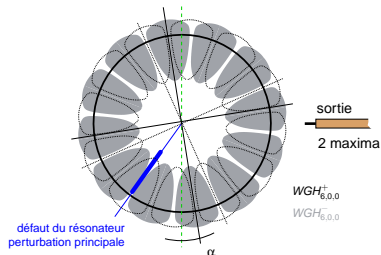
Décalage de fréquence 5 à 10 kHz \Rightarrow impossible à observer à T° ambiante car $\delta\nu \in [50 - 100 \text{ kHz}]$

Besoin d'un refroidissement pour observer dégénérescence car $\delta\nu \in [10 - 100 \text{ Hz}]$

Dégénérescence des modes de résonances

La dégénérescence est levée lorsqu'une imperfection brise la symétrie cylindrique \Rightarrow résonances dédoublées, peut rendre impossible l'exploitation du mode désiré

Cas réel : défauts du résonateur \Rightarrow perturbations principales



$WG H_{m,0,0}$, résolution des éq. de Maxwell :

$$H_{\theta} \propto \begin{cases} \sin m\theta \Rightarrow WG H_{m,0,0}^+ \\ \cos m\theta \Rightarrow WG H_{m,0,0}^- \end{cases}$$

Décalage de fréquence 5 à 10 kHz \Rightarrow impossible à observer à T° ambiante car $\delta\nu \in [50 - 100 \text{ kHz}]$

Besoin d'un refroidissement pour observer dégénérescence car $\delta\nu \in [10 - 100 \text{ Hz}]$

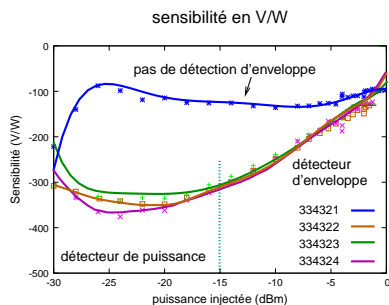
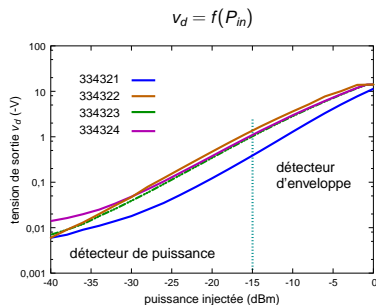
β_1^{\pm} des modes jumeaux nous informent sur α :

$$\alpha = \frac{1}{m} \arctan \sqrt{\frac{\beta_1^-}{\beta_1^+}}$$

Atténuation d'un mode jumeau : rotation du résonateur par rapport à son axe

Les détecteurs quadratiques : fonction de transfert des diodes Schottky

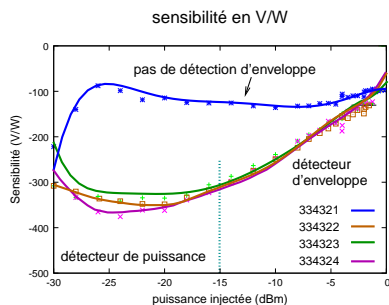
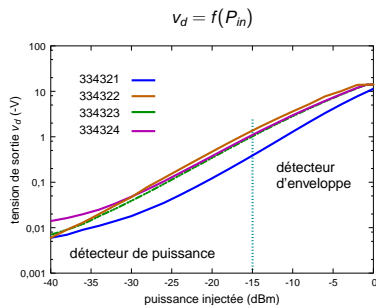
Diodes Schottky Herotek DZR400KA



S/N	$P_{in} = -20$ dBm	$P_{in} = -10$ dBm	$P_{in} = -6$ dBm
334321	-117 V/W	-133 V/W	-126 V/W
334322	-342 V/W	-274 V/W	-206 V/W
334323	-333 V/W	-242 V/W	-184 V/W
334324	-356 V/W	-248 V/W	-184 V/W

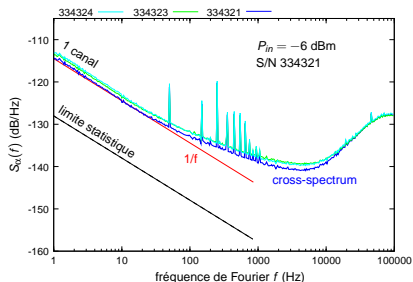
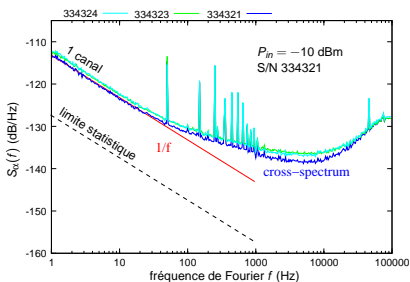
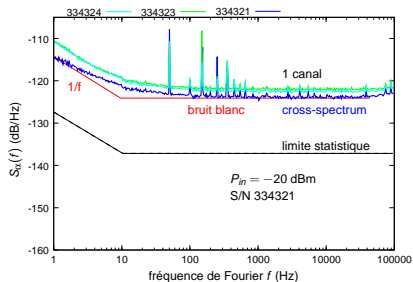
Les détecteurs quadratiques : fonction de transfert des diodes Schottky

Diodes Schottky Herotek DZR400KA



S/N	$P_{in} = -20$ dBm	$P_{in} = -10$ dBm	$P_{in} = -6$ dBm
334321	-117 V/W	-133 V/W	-126 V/W
334322	-342 V/W	-274 V/W	-206 V/W
334323	-333 V/W	-242 V/W	-184 V/W
334324	-356 V/W	-248 V/W	-184 V/W

Les détecteurs quadratiques : résultats de la mesure de bruit d'amplitude



400 moyennages

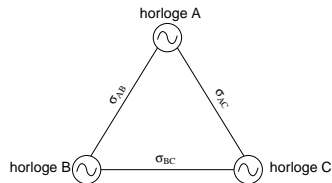
Diode mesurée : 334321

absence de région "détecteur d'enveloppe"

$k_{-1} = -115$ dB/Hz@1 Hz

pour $P_{in} = -6, -10$ et -20 dBm

Dérivé du 3 cornered Hat : principe



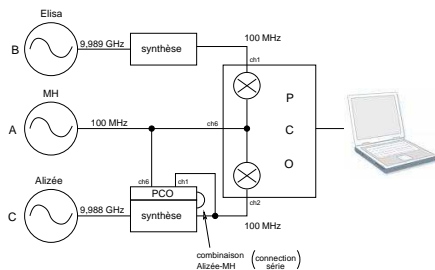
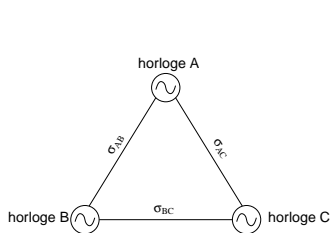
Cas réel :

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{2} [\sigma_{AB}^2 + \sigma_{AC}^2 - \sigma_{BC}^2]$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{2} [\sigma_{AB}^2 + \sigma_{BC}^2 - \sigma_{AC}^2]$$

$$\sigma_C^2 = \frac{1}{2} [\sigma_{AC}^2 + \sigma_{BC}^2 - \sigma_{AB}^2]$$

Dérivé du 3 cornered Hat : principe



Cas réel :

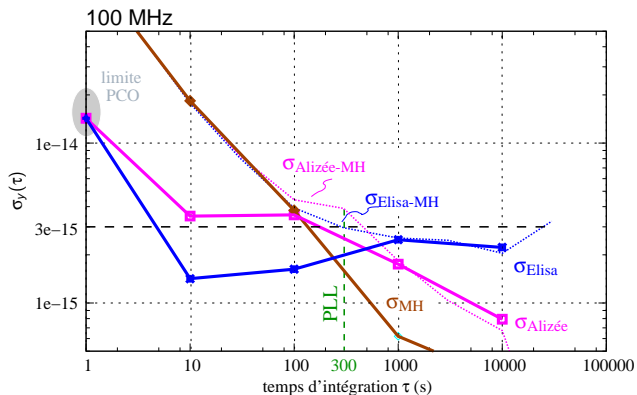
$$\sigma_A^2 = \frac{1}{2} [\sigma_{AB}^2 + \sigma_{AC}^2 - \sigma_{BC}^2]$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{2} [\sigma_{AB}^2 + \sigma_{BC}^2 - \sigma_{AC}^2]$$

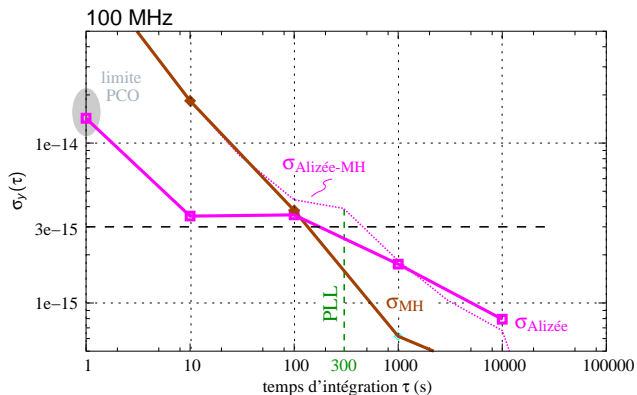
$$\sigma_C^2 = \frac{1}{2} [\sigma_{AC}^2 + \sigma_{BC}^2 - \sigma_{AB}^2]$$

Dans notre cas : σ_{BC} calculé avec différence des fluctuations de phase des paires AB et AC

Dérivé du 3 corner Hat : résultats

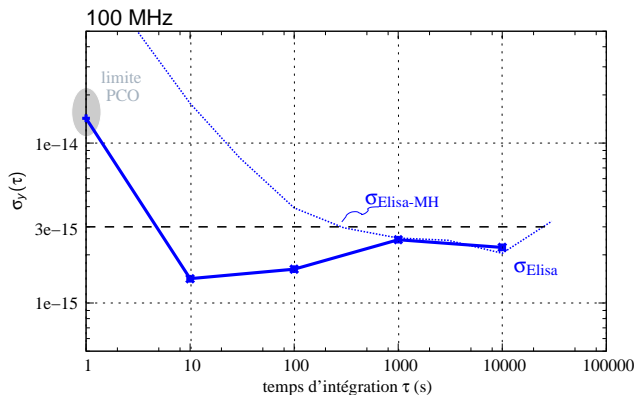


Dérivé du 3 corner Hat : résultats



- verrouillage long terme sur MH opérationnel

Dérivé du 3 corner Hat : résultats

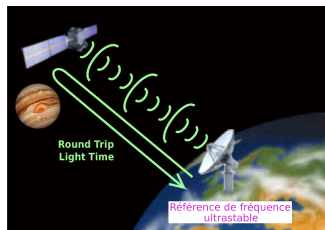


- verrouillage long terme sur MH opérationnel
- résultats long terme d'Elisa en adéquation avec le résultat précédent

Dérivé du 3 corner Hat : résultats

- Dans la vie de tous les jours :
téléphones portables
GPS...

- Dans le domaine de la science :
physique fondamentale
géodésie
**localisation géospatiale
des sondes spatiales...**



La localisation des sondes spatiales passe par la mesure de sa vitesse de déplacement (effet Doppler). Cette mesure doit se faire de manière précise. L'erreur ε_v ne doit pas excéder :

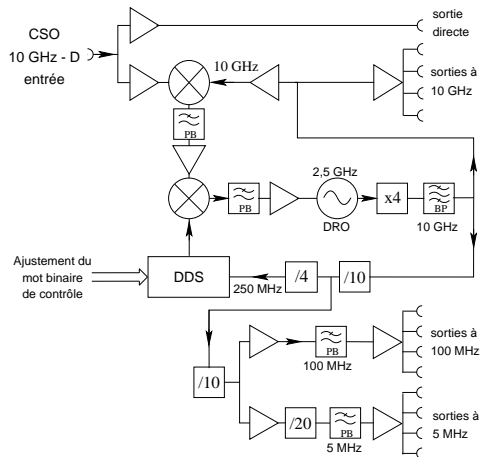
$$\varepsilon_v = \frac{c}{2} \sqrt{2 \frac{\text{RTL}}{\tau}} \sigma_y(\tau) \leq \mathbf{0,1 \text{ mm/s}}$$

Elle est **fonction** du "Round Trip Light Time" (RTL), du temps d'intégration τ et de la **stabilité de fréquence de la source émettrice** ($\sigma_y(\tau)$).

La chaîne de synthèse

Conçue par Timetech GmbH avec la collaboration de FEMTO-ST

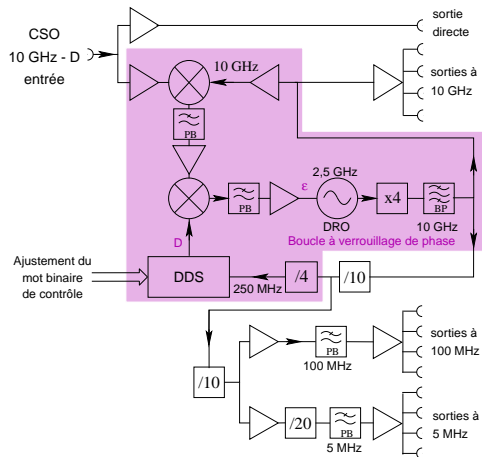
Fonction \Rightarrow générer signaux à 10 GHz, 100 MHz et 5 MHz



La chaîne de synthèse

Conçue par Timetech GmbH avec la collaboration de FEMTO-ST

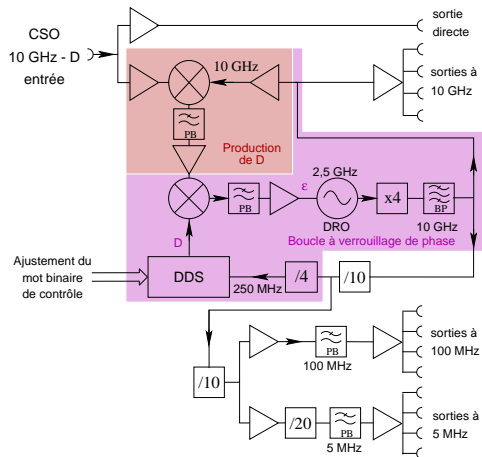
Fonction \Rightarrow générer signaux à 10 GHz, 100 MHz et 5 MHz



La chaîne de synthèse

Conçue par Timetech GmbH avec la collaboration de FEMTO-ST

Fonction \Rightarrow générer signaux à 10 GHz, 100 MHz et 5 MHz



La chaîne de synthèse

Conçue par Timetech GmbH avec la collaboration de FEMTO-ST

Fonction \Rightarrow générer signaux à 10 GHz, 100 MHz et 5 MHz

