



Référence Secondaire de Fréquence à Résonateur Saphir Cryogénique

Pierre-Yves BOURGEOIS

Institut FEMTO-ST, département LPMO-CNRS
Université de Franche-Comté

13 décembre 2004

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1 SPÉCIFICATIONS PRÉALABLES

- Une référence secondaire ?
- Quelques références de fréquence
- Etat de l'art des oscillateurs cryogéniques

2 LIMITES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

- Formule de Leeson
- Bruit thermique
- Bruit flicker

3 LE RÉSONATEUR

- Modes de galerie
- Avantages du résonateur saphir cryogénique
- Cavité fermée vs cavité ouverte

4 L'OSCILLATEUR

- L'environnement cryogénique
- Difficultés de mise au point

5 RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

6 POINT SINGULIER : RPE

7 CONCLUSION

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1 SPÉCIFICATIONS PRÉALABLES

- Une référence secondaire ?
- Quelques références de fréquence
- Etat de l'art des oscillateurs cryogéniques

2 LIMITES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

- Formule de Leeson
- Bruit thermique
- Bruit flicker

3 LE RÉSONATEUR

- Modes de galerie
- Avantages du résonateur saphir cryogénique
- Cavité fermée vs cavité ouverte

4 L'OSCILLATEUR

- L'environnement cryogénique
- Difficultés de mise au point

5 RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

6 POINT SINGULIER : RPE

7 CONCLUSION

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1 SPÉCIFICATIONS PRÉALABLES

- Une référence secondaire ?
- Quelques références de fréquence
- Etat de l'art des oscillateurs cryogéniques

2 LIMITES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

- Formule de Leeson
- Bruit thermique
- Bruit flicker

3 LE RÉSONATEUR

- Modes de galerie
- Avantages du résonateur saphir cryogénique
- Cavité fermée vs cavité ouverte

4 L'OSCILLATEUR

- L'environnement cryogénique
- Difficultés de mise au point

5 RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

6 POINT SINGULIER : RPE

7 CONCLUSION

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1 SPÉCIFICATIONS PRÉALABLES

- Une référence secondaire ?
- Quelques références de fréquence
- Etat de l'art des oscillateurs cryogéniques

2 LIMITES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

- Formule de Leeson
- Bruit thermique
- Bruit flicker

3 LE RÉSONATEUR

- Modes de galerie
- Avantages du résonateur saphir cryogénique
- Cavité fermée vs cavité ouverte

4 L'OSCILLATEUR

- L'environnement cryogénique
- Difficultés de mise au point

5 RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

6 POINT SINGULIER : RPE

7 CONCLUSION

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1 SPÉCIFICATIONS PRÉALABLES

- Une référence secondaire ?
- Quelques références de fréquence
- Etat de l'art des oscillateurs cryogéniques

2 LIMITES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

- Formule de Leeson
- Bruit thermique
- Bruit flicker

3 LE RÉSONATEUR

- Modes de galerie
- Avantages du résonateur saphir cryogénique
- Cavité fermée vs cavité ouverte

4 L'OSCILLATEUR

- L'environnement cryogénique
- Difficultés de mise au point

5 RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

6 POINT SINGULIER : RPE

7 CONCLUSION

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1 SPÉCIFICATIONS PRÉALABLES

- Une référence secondaire ?
- Quelques références de fréquence
- Etat de l'art des oscillateurs cryogéniques

2 LIMITES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

- Formule de Leeson
- Bruit thermique
- Bruit flicker

3 LE RÉSONATEUR

- Modes de galerie
- Avantages du résonateur saphir cryogénique
- Cavité fermée vs cavité ouverte

4 L'OSCILLATEUR

- L'environnement cryogénique
- Difficultés de mise au point

5 RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

6 POINT SINGULIER : RPE

7 CONCLUSION

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

1 SPÉCIFICATIONS PRÉALABLES

- Une référence secondaire ?
- Quelques références de fréquence
- Etat de l'art des oscillateurs cryogéniques

2 LIMITES DE LA STABILITÉ DE FRÉQUENCE

- Formule de Leeson
- Bruit thermique
- Bruit flicker

3 LE RÉSONATEUR

- Modes de galerie
- Avantages du résonateur saphir cryogénique
- Cavité fermée vs cavité ouverte

4 L'OSCILLATEUR

- L'environnement cryogénique
- Difficultés de mise au point

5 RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

6 POINT SINGULIER : RPE

7 CONCLUSION

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

POURQUOI DÉVELOPPER UNE RÉFÉRENCE SECONDAIRE ?

- Limitations du quartz pour l'interrogation des horloges à atomes froids.
→ $\sigma_y(\tau) < 5 \cdot 10^{-14}$ $1\text{s} < \tau < 1000\text{s}$
- Expériences de physique fondamentale
→ $\sigma_y(\tau) < 1 \cdot 10^{-13}$ /jour
- Caractérisation d'oscillateurs ultrastables de qualité métrologique notamment pour le spatial.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

POURQUOI DÉVELOPPER UNE RÉFÉRENCE SECONDAIRE ?

- Limitations du quartz pour l'interrogation des horloges à atomes froids.
→ $\sigma_y(\tau) < 5 \cdot 10^{-14}$ $1\text{s} < \tau < 1000\text{s}$
- Expériences de physique fondamentale
→ $\sigma_y(\tau) < 1 \cdot 10^{-13}/\text{jour}$
- Caractérisation d'oscillateurs ultrastables de qualité métrologique notamment pour le spatial.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

POURQUOI DÉVELOPPER UNE RÉFÉRENCE SECONDAIRE ?

- Limitations du quartz pour l'interrogation des horloges à atomes froids.
 $\rightarrow \sigma_Y(\tau) < 5 \cdot 10^{-14} \quad 1\text{s} < \tau < 1000\text{s}$
- Expériences de physique fondamentale
 $\rightarrow \sigma_Y(\tau) < 1 \cdot 10^{-13}/\text{jour}$
- Caractérisation d'oscillateurs ultrastables de qualité métrologique notamment pour le spatial.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

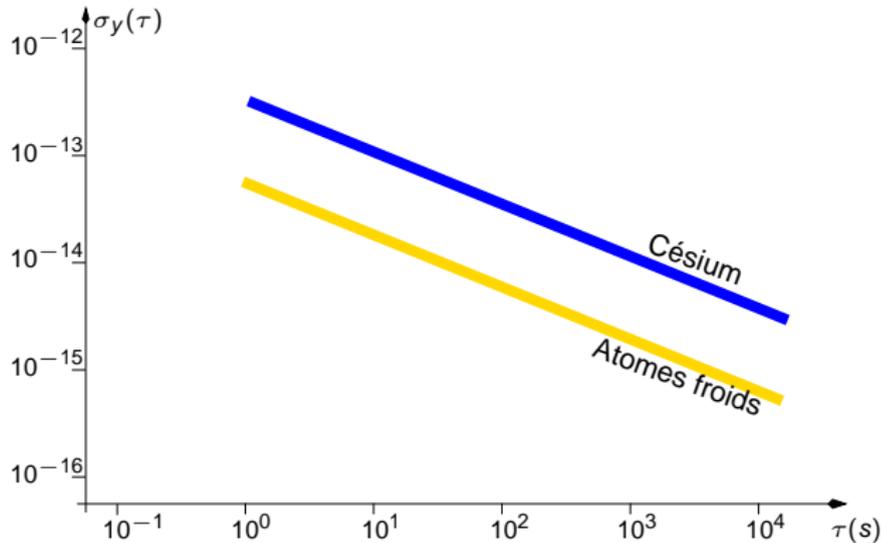
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFÉRENTES RÉFÉRENCES DE FRÉQUENCE



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

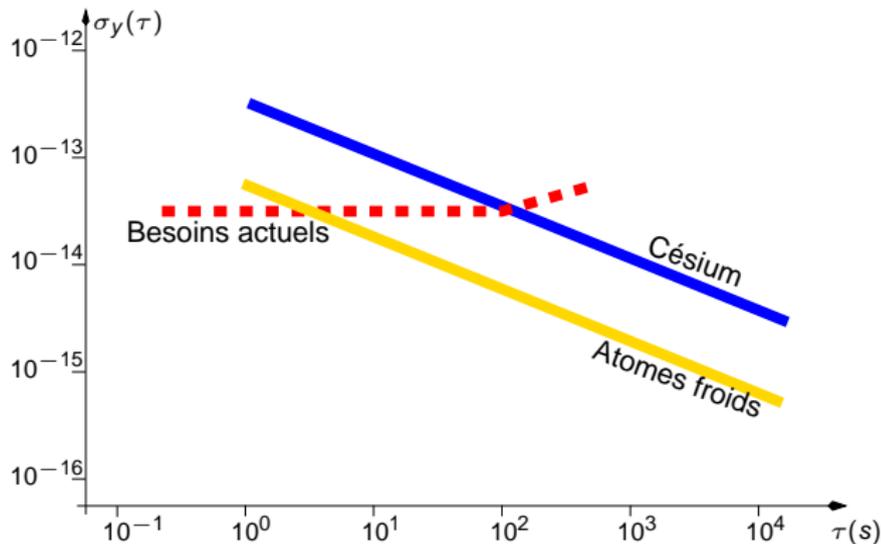
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFÉRENTES RÉFÉRENCES DE FRÉQUENCE



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

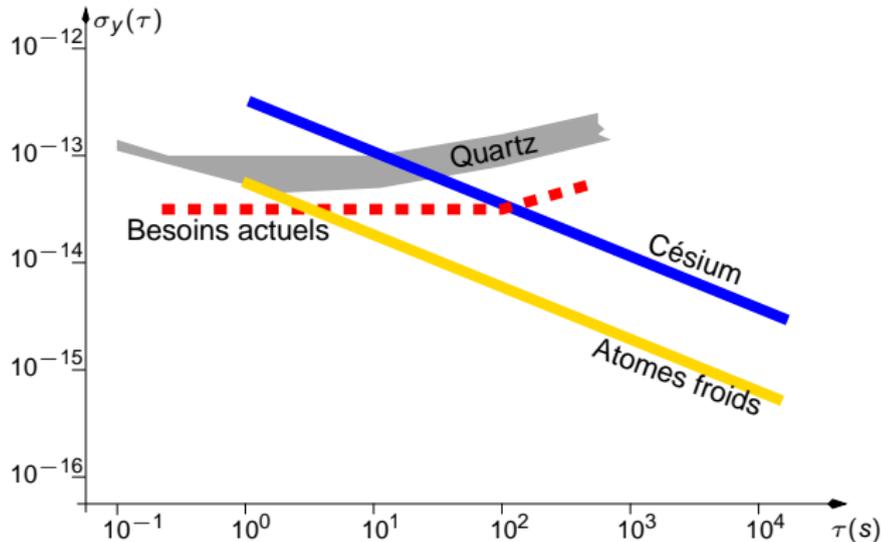
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFÉRENTES RÉFÉRENCES DE FRÉQUENCE



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

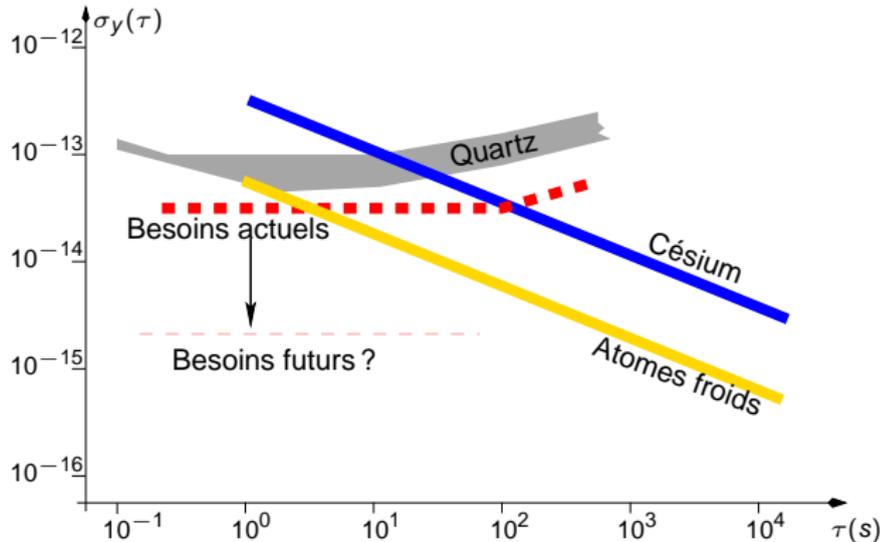
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFÉRENTES RÉFÉRENCES DE FRÉQUENCE



Quel serait le meilleur candidat possible pour une référence secondaire ?

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

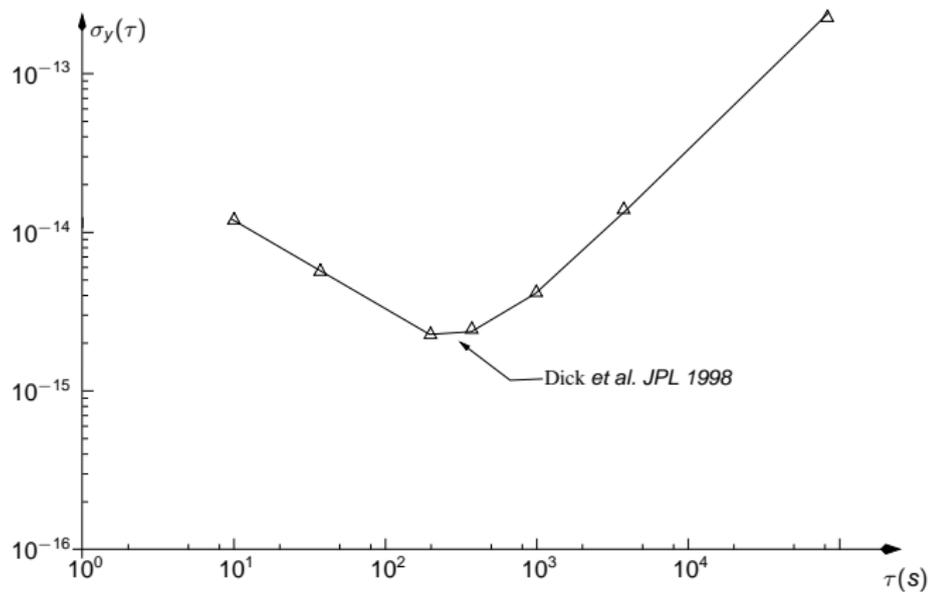
Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

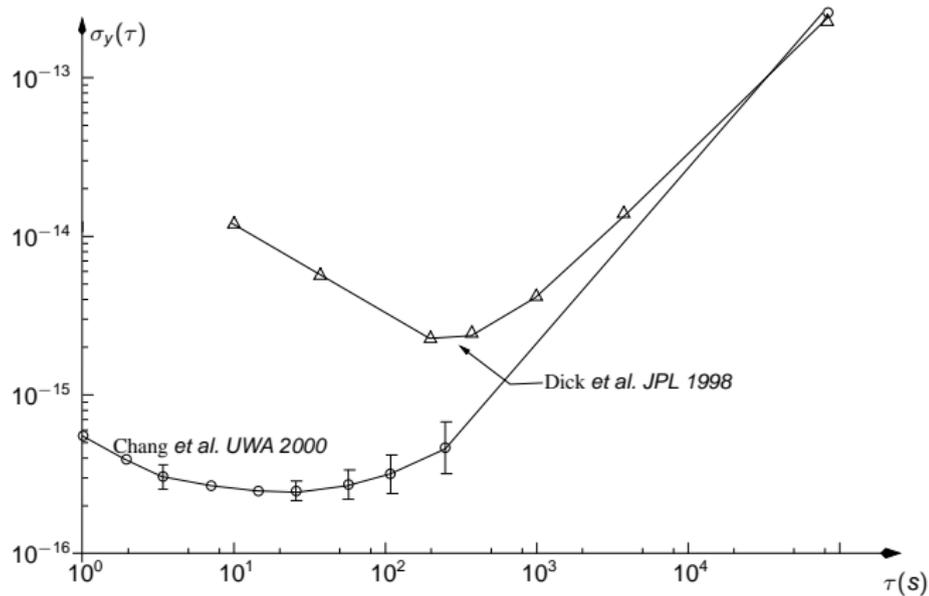
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

ETAT DE L'ART



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

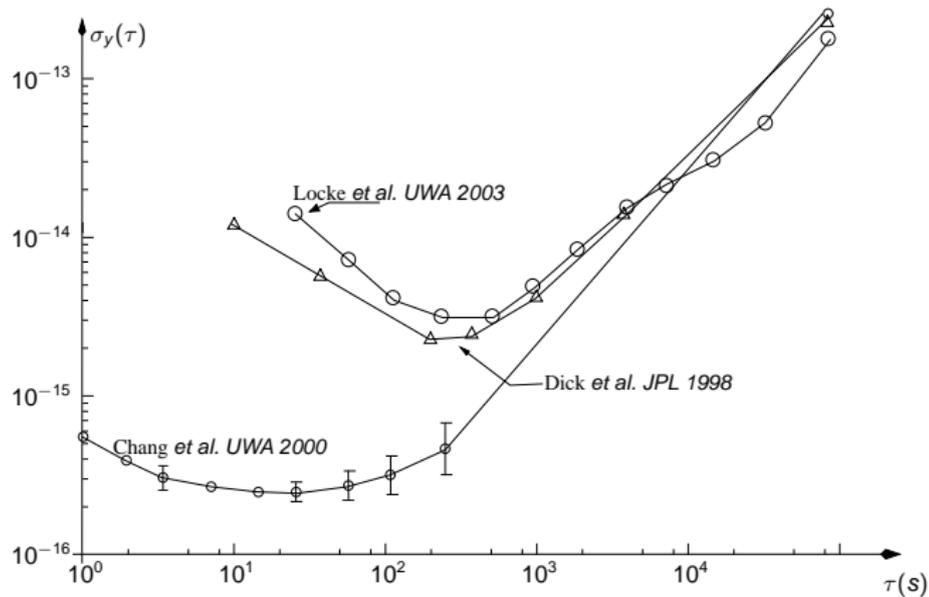
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

ETAT DE L'ART



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

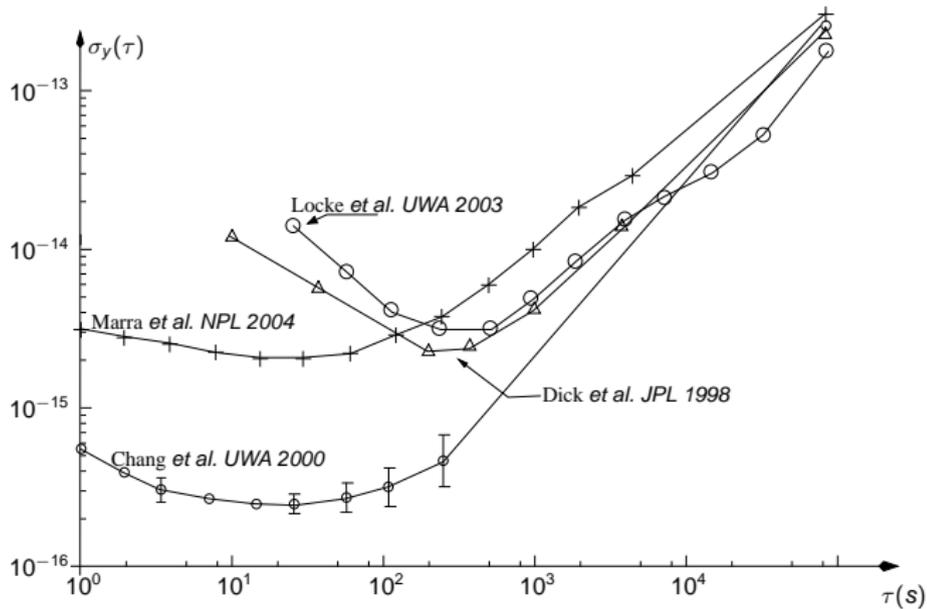
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

ETAT DE L'ART



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Une référence
secondaire ?

Quelques références
de fréquence

Etat de l'art des
oscillateurs
cryogéniques

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

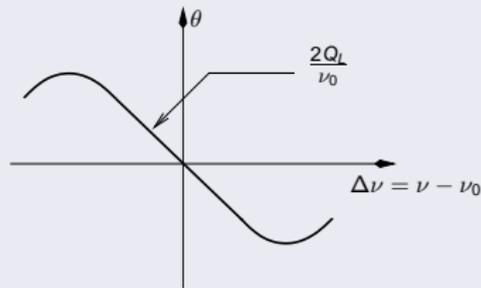
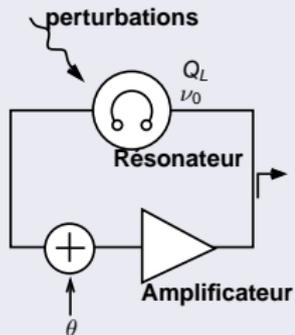
Point singulier :
RPE

Conclusion

CARACTÉRISATION DE L'INSTABILITÉ RELATIVE DE FRÉQUENCE

FORMULE DE LEESON

FORMULE DE LEESON



$$S_{\nu}(f) = \left(1 + \frac{\nu_0^2}{4Q_L^2} \frac{1}{f^2}\right) S_{\theta}(f)$$

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Formule de Leeson

Bruit thermique

Bruit flicker

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

CARACTÉRISATION DE L'INSTABILITÉ RELATIVE DE FRÉQUENCE

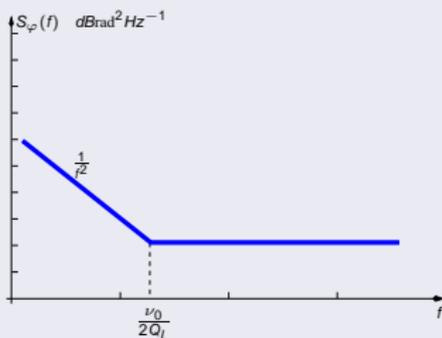
LIMITATION DUE AU BRUIT THERMIQUE

LE BRUIT THERMIQUE

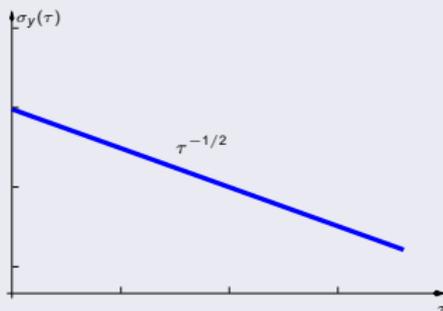
$$S_{\theta}(f) = Fk_B T/P$$

$$S_{\varphi}(f) = \frac{\nu_0^2}{f^2} \frac{Fk_B T}{4PQ_L^2}$$

$$\sigma_{y_{th}}(\tau) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Fk_B T}{2PQ_L^2 \tau}}$$



quartz (5MHz) $\rightarrow 4 \cdot 10^{-15}$ @1s
saphir cryogénique (10GHz) $\rightarrow 4 \cdot 10^{-18}$ @1s



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Formule de Leeson

Bruit thermique

Bruit flicker

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

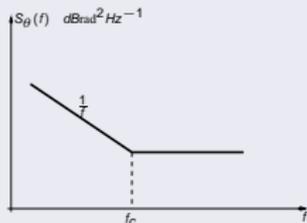
Point singulier :
RPE

Conclusion

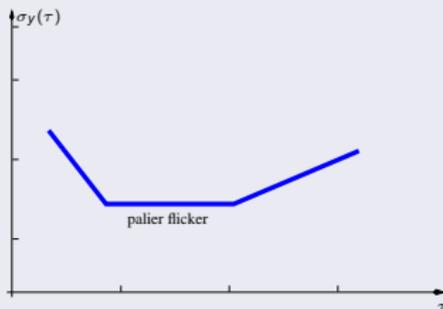
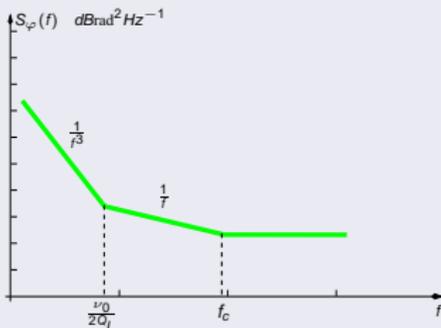
CARACTÉRISATION DE L'INSTABILITÉ RELATIVE DE FRÉQUENCE

LIMITATION DUE AU BRUIT FLICKER

LE BRUIT FLICKER



$$S_\theta(f) = \left(1 + \frac{f_c}{f}\right) \frac{Fk_B T}{P}$$



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Formule de Leeson
Bruit thermique
Bruit flicker

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

LE RÉSONATEUR

Pourquoi utiliser un résonateur saphir excité sur des modes de galerie et refroidi à la température de l'hélium liquide ?

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

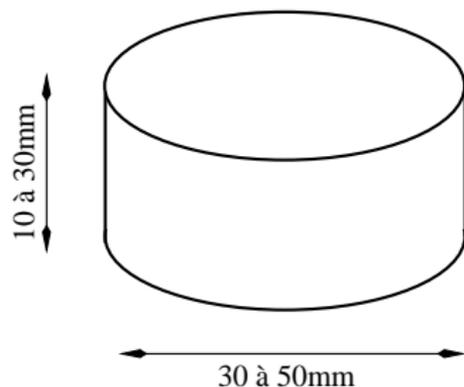
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r
→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

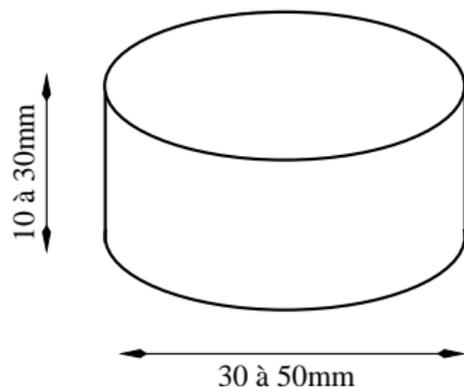
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r
→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

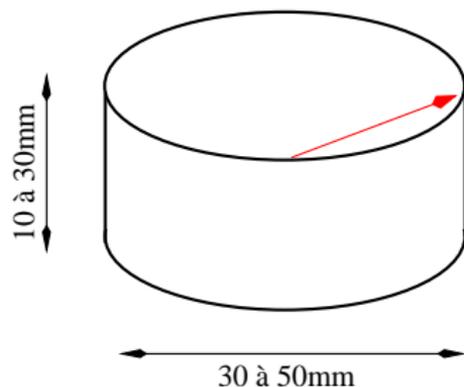
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r

→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

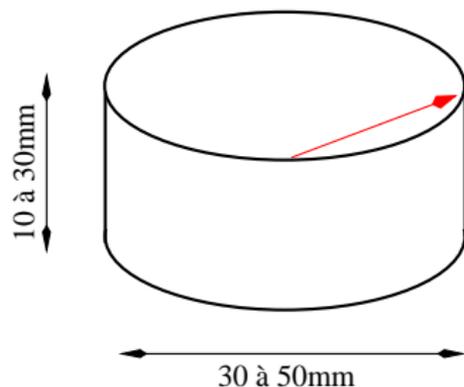
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r

→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

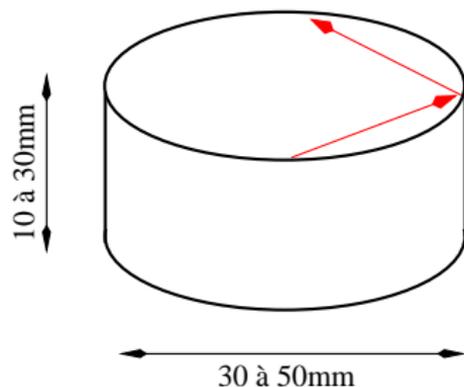
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r

→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

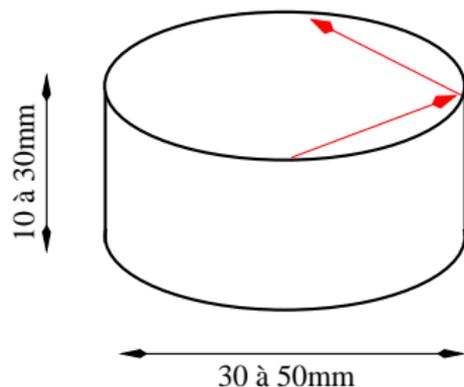
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r

→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

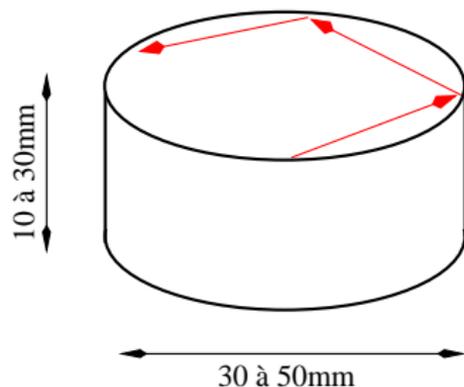
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r

→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

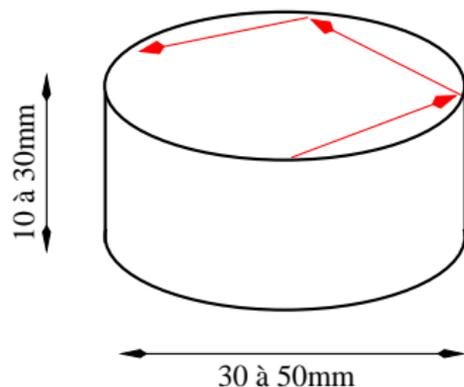
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r

→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

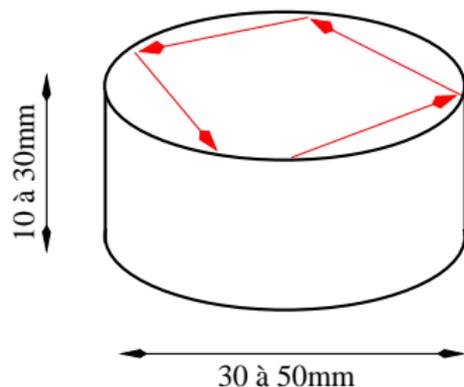
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Excitation de modes électromagnétiques d'ordre élevé.

Grâce aux faibles pertes du matériau, et malgré une faible valeur de ϵ_r
→ Q importants, en particulier à basse température.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

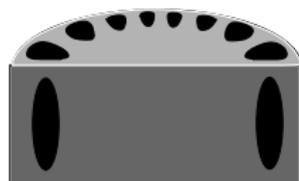
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

MODES DE GALERIE

STRUCTURE DES MODES DANS LE SAPHIR



- L'énergie électromagnétique est bien stockée à la périphérie du résonateur
- A l'extérieur, les ondes sont évanescentes

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

LE RÉSONATEUR SAPHIR CRYOGÉNIQUE

PROPRIÉTÉS IMPORTANTES DU SAPHIR



Q élevés lorsque $T \searrow$
 $\rightarrow 10^9 @ 4.2K$

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

LE RÉSONATEUR SAPHIR CRYOGÉNIQUE

PROPRIÉTÉS IMPORTANTES DU SAPHIR



Q élevés lorsque $T \searrow$
 $\rightarrow 10^9 @ 4.2K$



Sensibilité élevée à la température
 $\approx -10ppm/K @ 77K$

\rightarrow si régulation à $100\mu K \hookrightarrow \sigma_y(\tau) \sim 10^{-9}$

MAIS

Référence
 Secondaire
 de Fréquence
 à Résonateur
 Saphir
 Cryogénique

Spécifications
 préalables

Limites de la
 stabilité de
 fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
 résonateur saphir
 cryogénique

Cavité fermée vs
 cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
 d'expériences

Point singulier :
 RPE

Conclusion

LE RÉSONATEUR SAPHIR CRYOGÉNIQUE

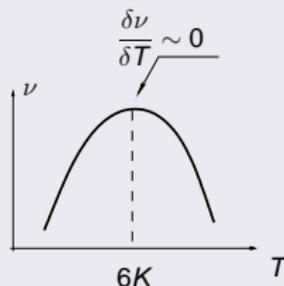
AVANTAGES DU SAPHIR REFROIDI



Q élevés lorsque $T \searrow$
 $\rightarrow 10^9 @ 4.2K$



impuretés paramagnétiques



Référence
 Secondaire
 de Fréquence
 à Résonateur
 Saphir
 Cryogénique

Spécifications
 préalables

Limites de la
 stabilité de
 fréquence

Le résonateur
 Modes de galerie
 Avantages du
 résonateur saphir
 cryogénique
 Cavité fermée vs
 cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
 d'expériences

Point singulier :
 RPE

Conclusion

LE RÉSONATEUR SAPHIR CRYOGÉNIQUE EXCITÉ SUR DES MODES DE GALERIE

AVANTAGES DU SAPHIR REFROIDI

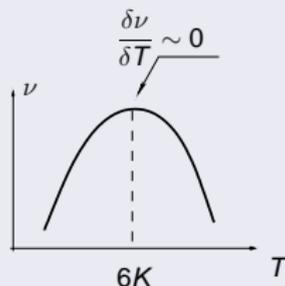


Q élevés lorsque $T \searrow$
 $\rightarrow 10^9 @ 4.2K$



impuretés paramagnétiques

\Rightarrow conditions réunies pour l'obtention de hautes stabilités de fréquence



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur
Modes de galerie
Avantages du
résonateur saphir
cryogénique
Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

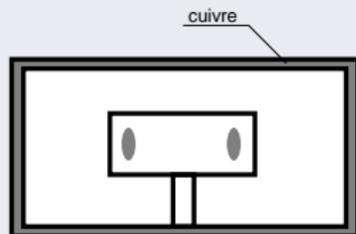
Point singulier :
RPE

Conclusion

CAVITÉ FERMÉE VS CAVITÉ OUVERTE

LA CAVITÉ FERMÉE

UTILISATION TRADITIONNELLE DE CAVITÉ



a) cavité "fermée"



Permet de limiter les pertes
par radiation



Q élevés

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

**Cavité fermée vs
cavité ouverte**

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

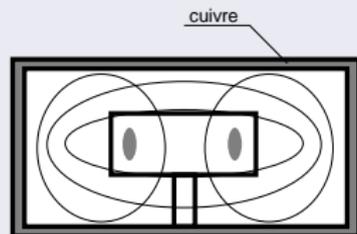
Point singulier :
RPE

Conclusion

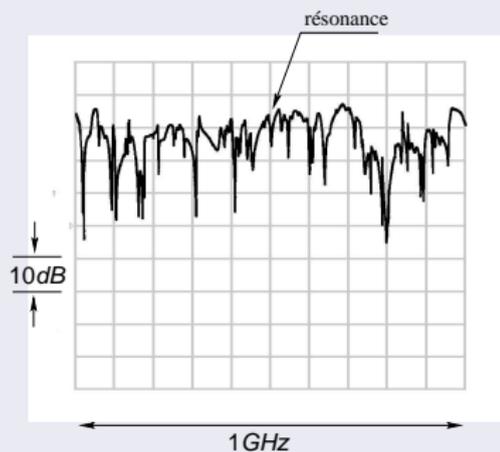
CAVITÉ FERMÉE VS CAVITÉ OUVERTE

LA CAVITÉ FERMÉE

UTILISATION TRADITIONNELLE DE CAVITÉ



a) cavité "fermée"



Permet de limiter les pertes
par radiation



Q élevés



Multiplicité de modes
parasites

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie
Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

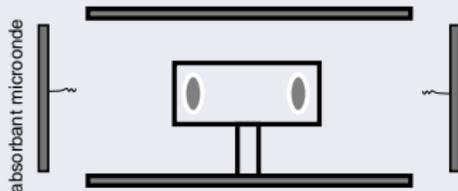
Point singulier :
RPE

Conclusion

CAVITÉ FERMÉE VS CAVITÉ OUVERTE

LA CAVITÉ OUVERTE

IDÉE ORIGINALE : RETIRER LES MURS MÉTALLIQUES



b) cavité "ouverte"

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

**Cavité fermée vs
cavité ouverte**

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

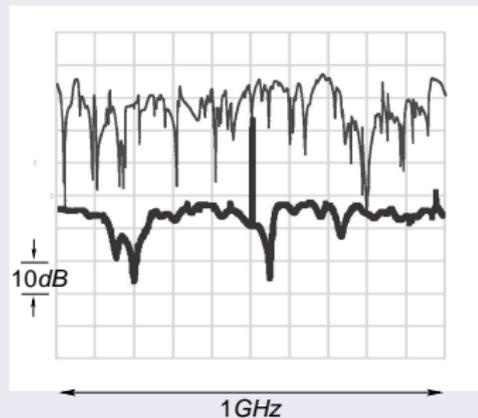
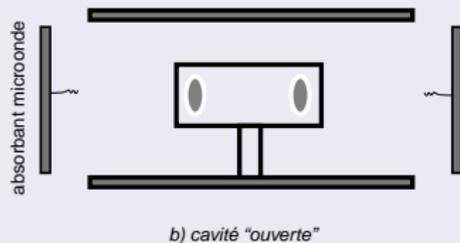
Point singulier :
RPE

Conclusion

CAVITÉ FERMÉE VS CAVITÉ OUVERTE

LA CAVITÉ OUVERTE

COMPARAISON DES DEUX STRUCTURES



Suppression totale des modes parasites !

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

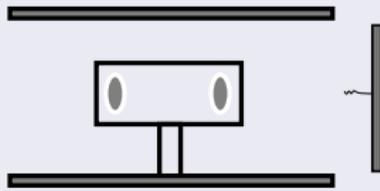
Conclusion

CAVITÉ FERMÉE VS CAVITÉ OUVERTE

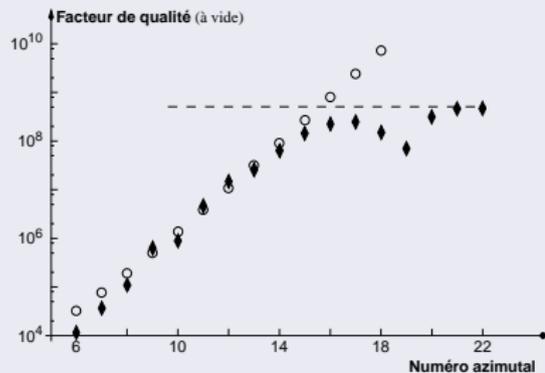
LA CAVITÉ OUVERTE

IDÉE ORIGINALE : RETIRER LES MURS MÉTALLIQUES

absorbant microonde



b) cavité "ouverte"



Q plus faibles

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

Modes de galerie

Avantages du
résonateur saphir
cryogénique

Cavité fermée vs
cavité ouverte

L'oscillateur

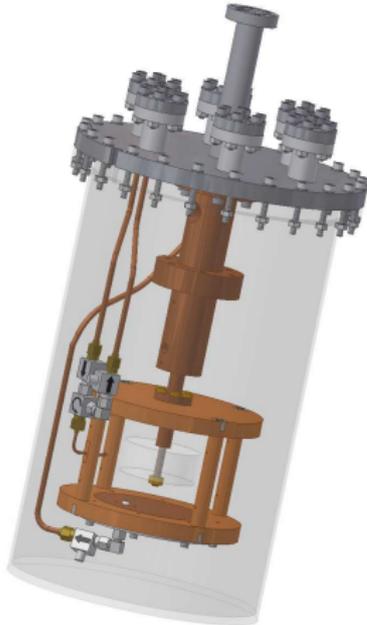
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

L'OSCILLATEUR CRYOGÉNIQUE

LA BOÎTE CRYOGÉNIQUE



- doigt froid
- isolateurs et circulateur
- câbles semi-rigides microondes
- éléments de chauffage

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

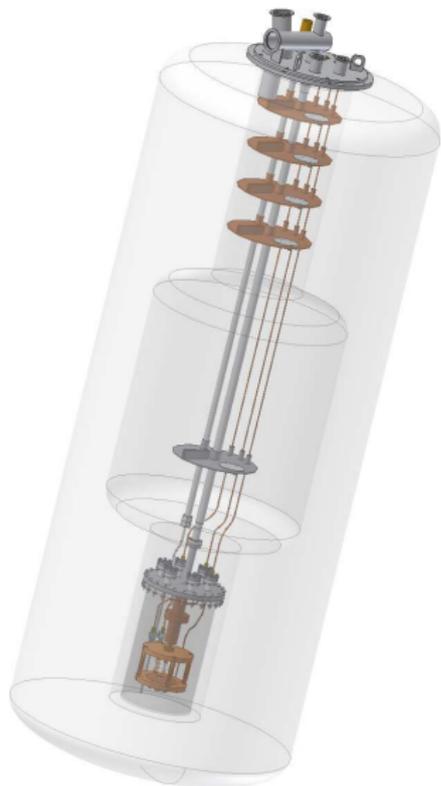
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

L'OSCILLATEUR CRYOGÉNIQUE

L'INSERT CRYOGÉNIQUE



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

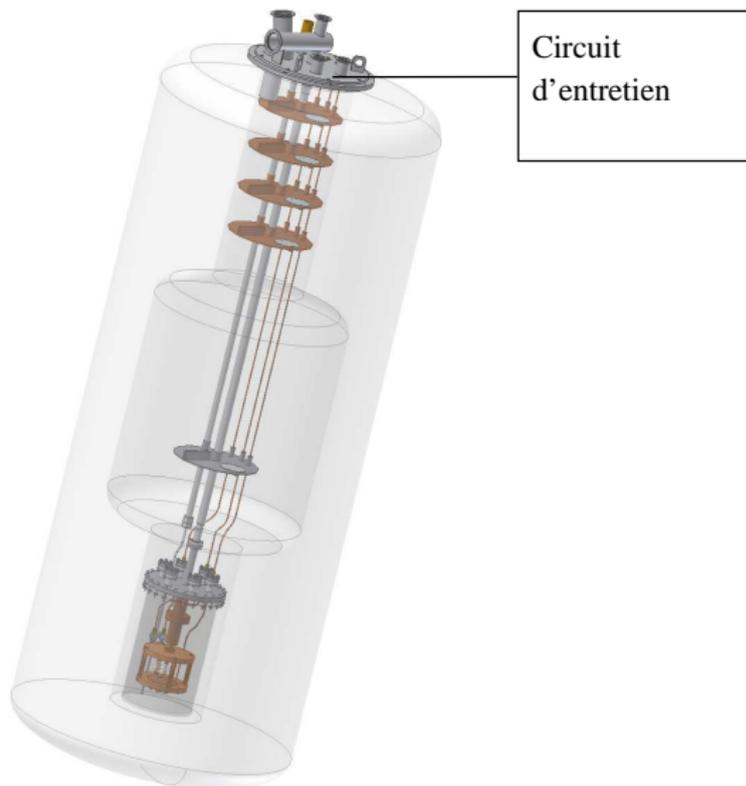
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

L'OSCILLATEUR CRYOGÉNIQUE

L'INSERT CRYOGÉNIQUE ET LE DISPOSITIF D'ENTRETIEN



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

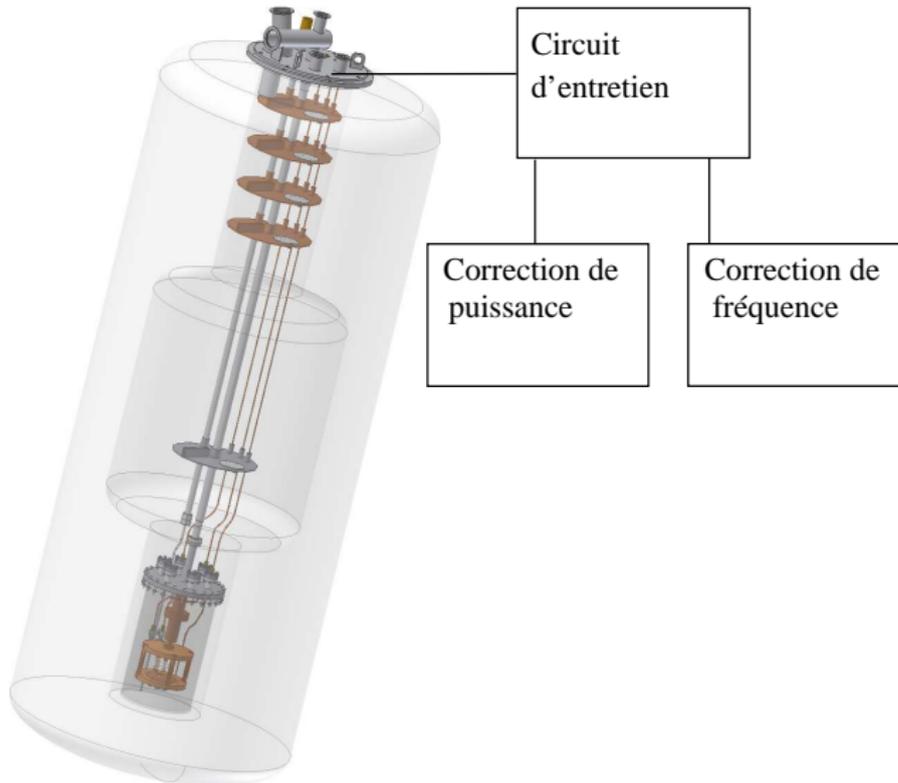
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

L'OSCILLATEUR CRYOGÉNIQUE

L'INSERT CRYOGÉNIQUE ET LE DISPOSITIF D'ENTRETIEN



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

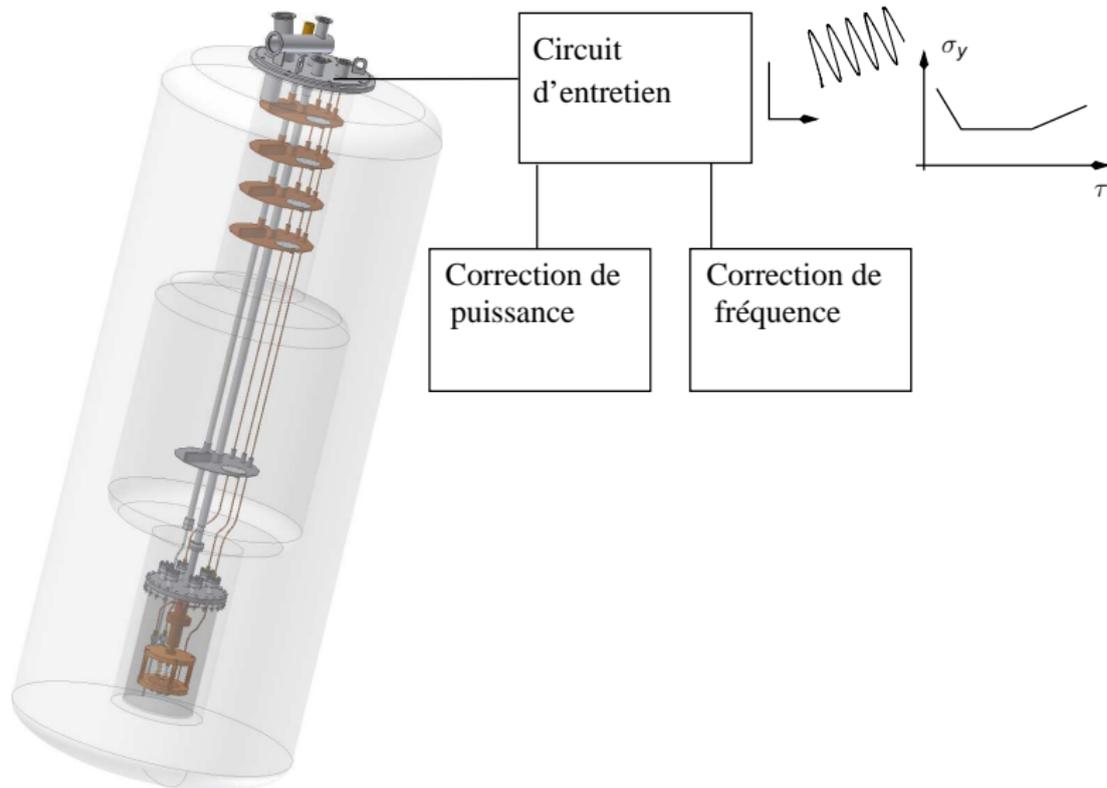
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

L'OSCILLATEUR CRYOGÉNIQUE

EXTRACTION DE SIGNAL ET MESURE DE STABILITÉ



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

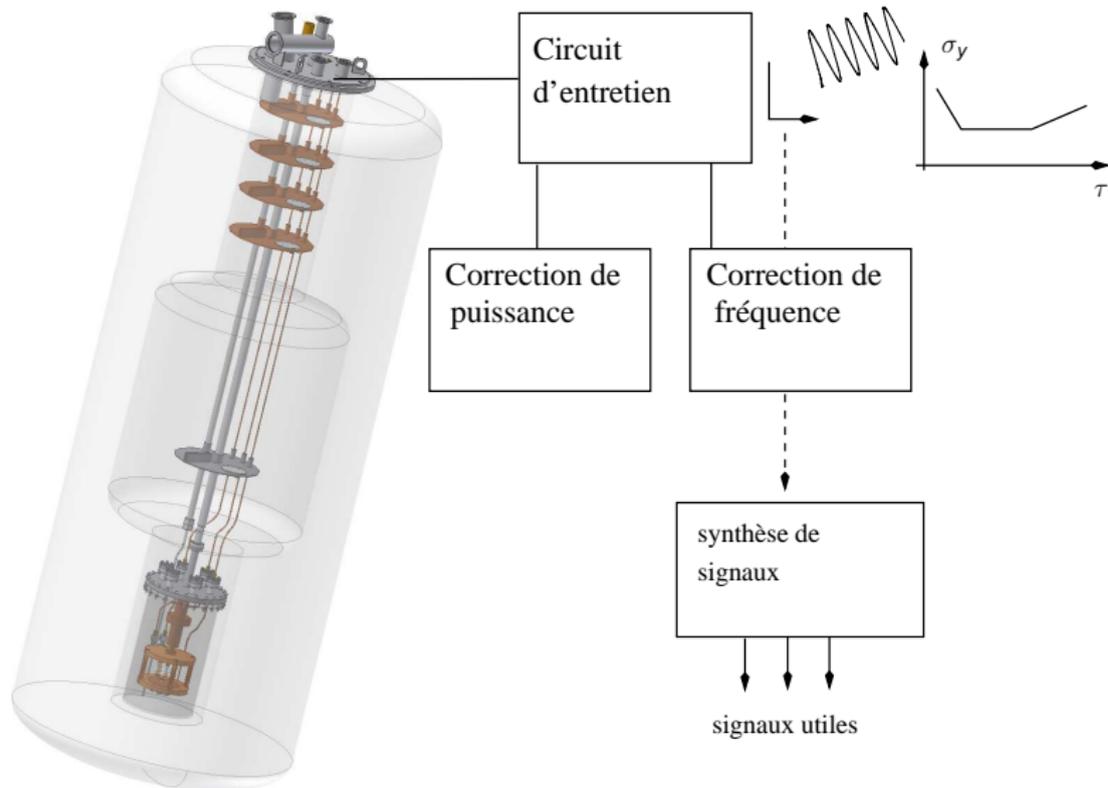
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

L'OSCILLATEUR CRYOGÉNIQUE

TRANSFERT DE LA STABILITÉ AUX BASSES FRÉQUENCES



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Différents cas de mise au
point

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DU RÉSONATEUR

COUPLAGES DU RÉSONATEUR

- problèmes de répétabilité

- $\frac{\beta_{1(4.2K)}}{\beta_{2(300K)}} = 10^3 \rightarrow$ modes invisibles à T_{ambiante}

DÉGÉNÉRESCENCE

- $E_z(r, \varphi, z) = AJ_m(k_r) \left\{ \begin{array}{l} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{array} \right\} \cos \beta_z$

- Comment ne privilégier qu'un seul mode ?

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DU RÉSONATEUR

COUPLAGES DU RÉSONATEUR

- problèmes de répétabilité

- $\frac{\beta_1(4.2K)}{\beta_2(300K)} = 10^3 \rightarrow$ modes invisibles à T_{ambiante}

DÉGÉNÉRESCENCE

- $E_z(r, \varphi, z) = AJ_m(k_r) \left\{ \begin{array}{l} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{array} \right\} \cos \beta_z$

- Comment ne privilégier qu'un seul mode ?



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DU RÉSONATEUR

COUPLAGES DU RÉSONATEUR

- problèmes de répétabilité

- $\frac{\beta_1(4.2K)}{\beta_2(300K)} = 10^3 \rightarrow$ modes invisibles à T_{ambiante}

DÉGÉNÉRESCENCE

- $E_z(r, \varphi, z) = AJ_m(k_r) \left\{ \begin{array}{l} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{array} \right\} \cos \beta_z$

- Comment ne privilégier qu'un seul mode ?



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DU RÉSONATEUR

COUPLAGES DU RÉSONATEUR

- problèmes de répétabilité

- $\frac{\beta_1(4.2K)}{\beta_2(300K)} = 10^3 \rightarrow$ modes invisibles à T_{ambiante}

DÉGÉNÉRESCENCE

- $E_z(r, \varphi, z) = AJ_m(k_r) \left\{ \begin{array}{l} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{array} \right\} \cos \beta_z$

- Comment ne privilégier qu'un seul mode ?



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DU RÉSONATEUR

COUPLAGES DU RÉSONATEUR

- problèmes de répétabilité

- $\frac{\beta_1(4.2K)}{\beta_2(300K)} = 10^3 \rightarrow$ modes invisibles à T_{ambiante}

DÉGÉNÉRESCENCE

- $E_z(r, \varphi, z) = AJ_m(k_r) \left\{ \begin{array}{l} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{array} \right\} \cos \beta_z$

- Comment ne privilégier qu'un seul mode ?



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Diffi cultés de mise au
point

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

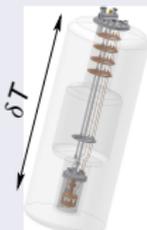
DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DE L'OSCILLATEUR

FORTES VARIATIONS DE PHASE LE LONG DU SYSTÈME D'ENTRETIEN

$$\frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{1}{2Q_L} \cdot 2\pi \cdot \frac{L_e}{\lambda_0} \cdot \alpha_{cu} \Rightarrow \sim 4 \cdot 10^{-12} K^{-1}$$

avec $Q_L = 5 \cdot 10^8$, $\nu_0 = 10\text{GHz}$, et $\alpha_{cu} \sim 2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$



De plus, on ne tient pas compte
des gradients de température

⇒ la phase doit être corrigée au moyen d'un discriminateur de Pound

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Difficultés de mise au
point

Résultats
d'expériences

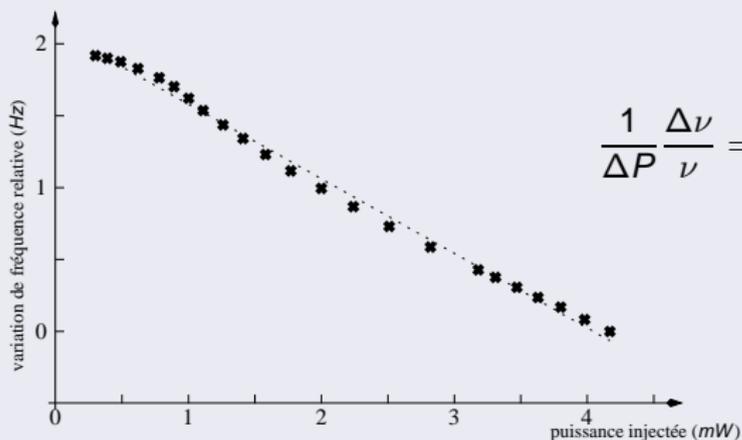
Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DE L'OSCILLATEUR

SENSIBILITÉ À LA PUISSANCE μW INJECTÉE



⇒ la puissance doit être également corrigée

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Difficultés de mise au
point

Résultats
d'expériences

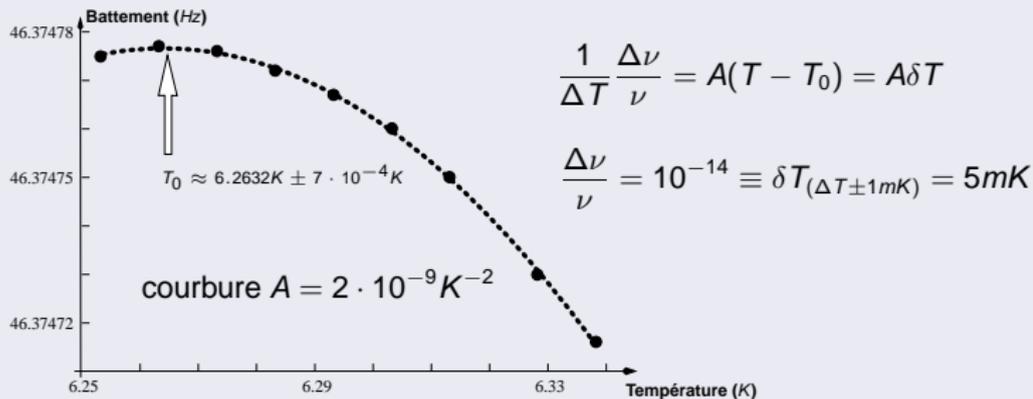
Point singulier :
RPE

Conclusion

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MISE AU POINT

AU NIVEAU DE L'OSCILLATEUR

RECHERCHE DU POINT D'INVERSION



Dans notre cas, $\sigma_{y_{\text{lim}}} \sim 10^{-15}$

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

L'environnement
cryogénique

Difficultés de mise au
point

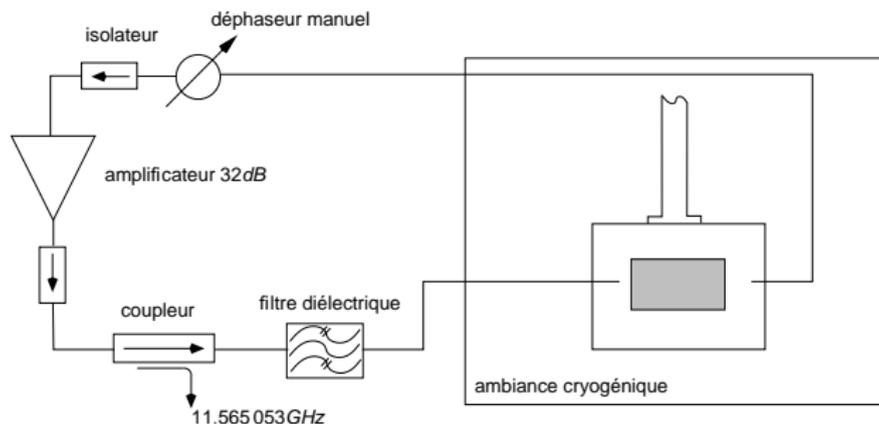
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

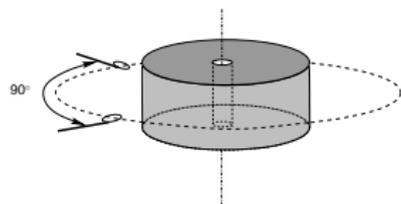
Conclusion

PREMIER RÉSULTAT

JUIN 2002



WG $H_{16,0,0}$



couplages H_{φ} , H_{φ}

$Q_L = 200$ millions

$\beta_1 = 0.35$; $\beta_2 = 0.07$

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

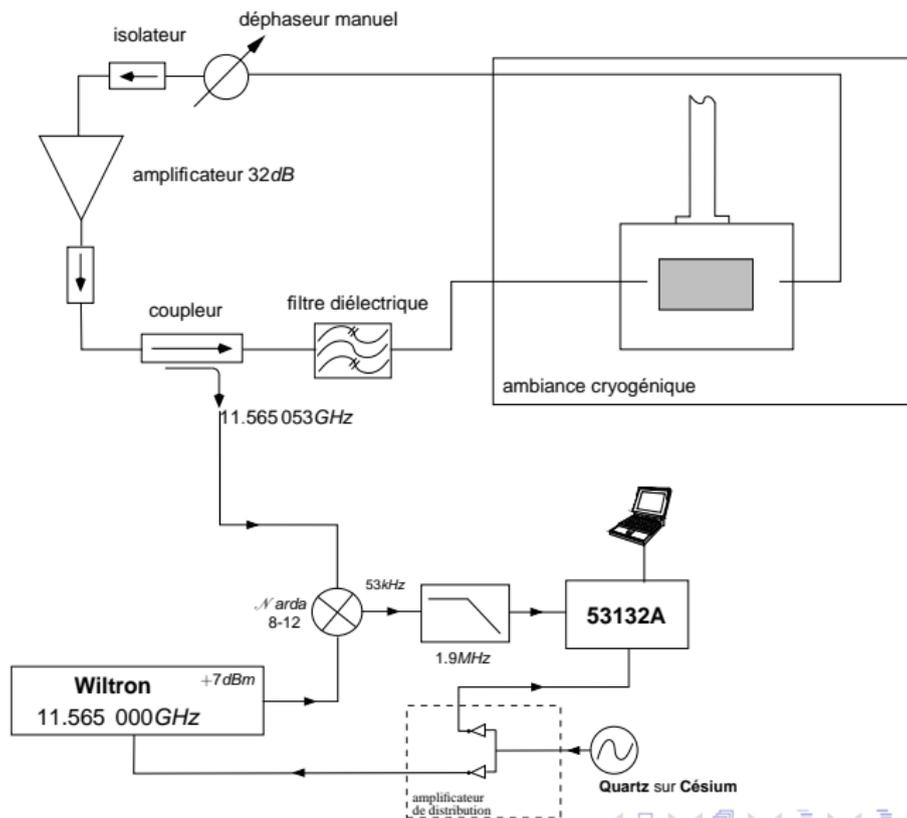
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

PREMIER RÉSULTAT

JUIN 2002



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

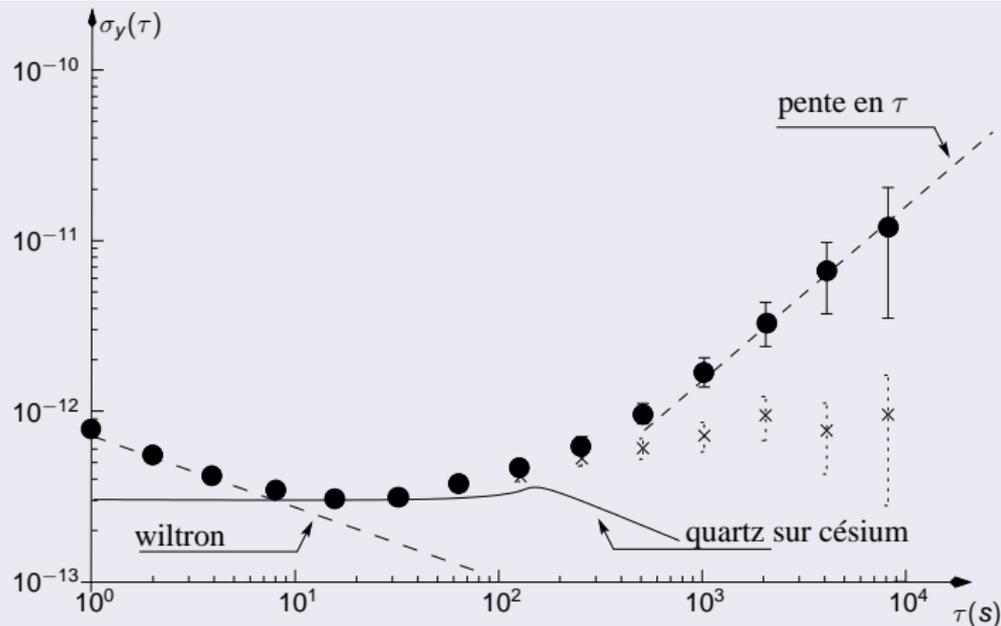
Point singulier :
RPE

Conclusion

PREMIER RÉSULTAT

JUIN 2002-STABILITÉ

$\sigma_y(\tau)$ DE NOTRE PREMIER OSCILLATEUR



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

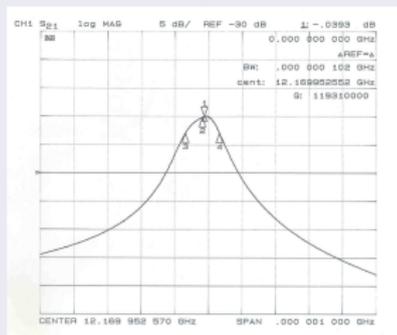
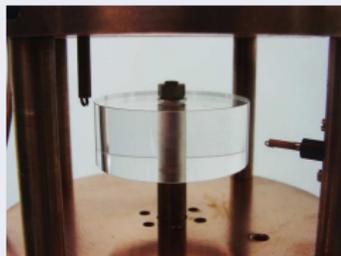
Point singulier :
RPE

Conclusion

PREMIÈRE AMÉLIORATION

JANVIER 2003-MONTAGE 1

IMPLÉMENTATION DU CORRECTEUR DE POUND

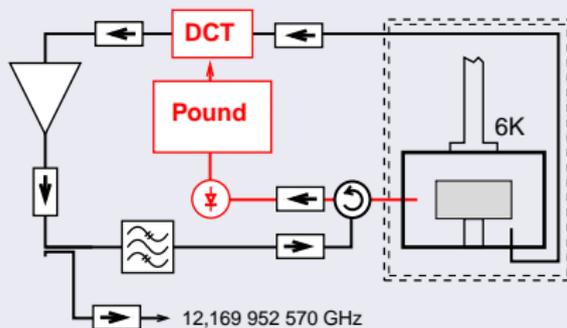


$WG_{H_{17,0,0}}@12.169\text{GHz}$

$Q_L = 12 \cdot 10^7$

$\beta_1 = 1.14$

$\beta_2 \sim 0$



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

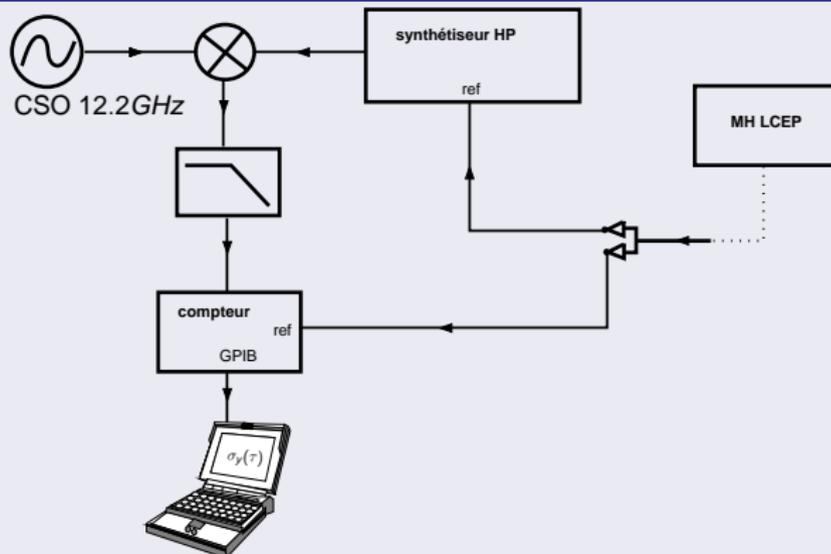
Conclusion



PREMIÈRE AMÉLIORATION

JANVIER 2003-MESURE

COMPARAISON DU CSO AVEC LE MASER



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

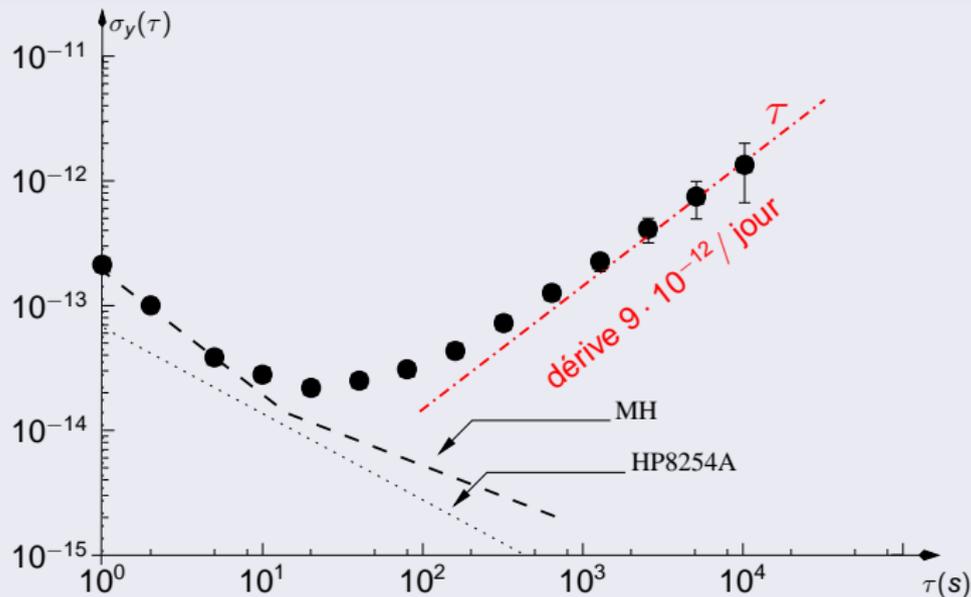
Point singulier :
RPE

Conclusion

PREMIÈRE AMÉLIORATION

JANVIER 2003-STABILITÉ

$\sigma_y(\tau)$ DE L'OSCILLATEUR



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DEUXIÈME AMÉLIORATION

FÉVRIER 2003

NOUVELLE VERSION



mode $WGH_{17,0,0}$ @12.169GHz

modification importante : isolateurs et

circulateur au plus près du résonateur

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

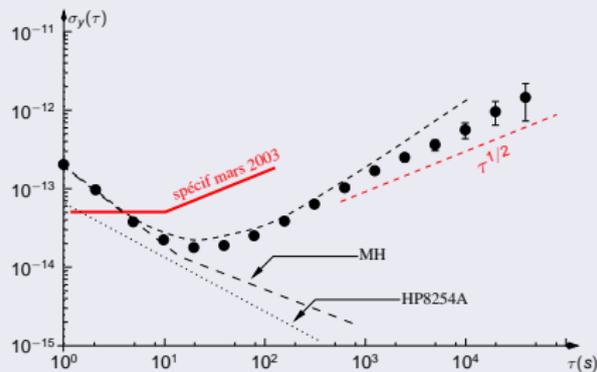
Point singulier :
RPE

Conclusion

DEUXIÈME AMÉLIORATION

FÉVRIER 2003

$\sigma_y(\tau)$ DE LA NOUVELLE VERSION



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

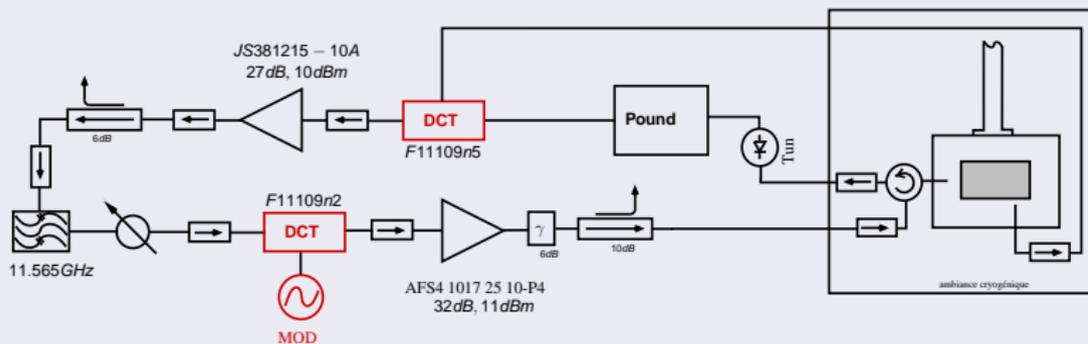
Conclusion

2 DÉPHASEURS : MODULATION ET CORRECTION

$$WG H_{16,0,0} @ 11.565 \text{ GHz} ; \beta_1 = 0.2 ; \beta_2 = 6 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_L = 160 \cdot 10^6$$

$$T_0 = 6.263 \text{ K}$$



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

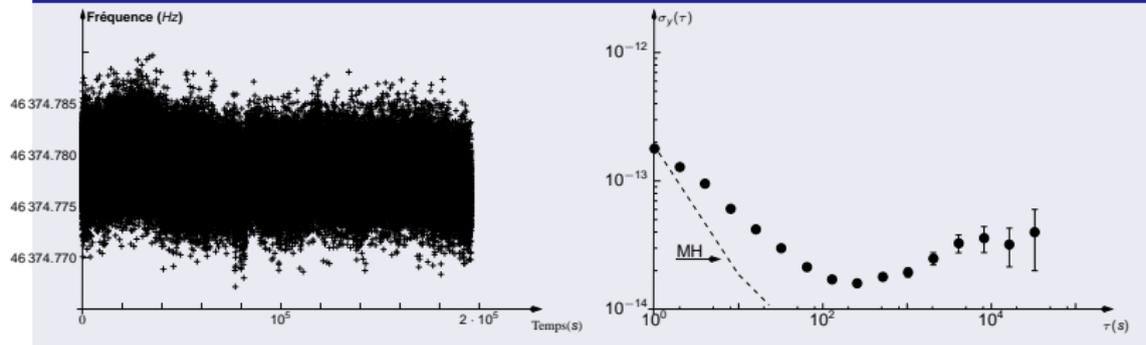
Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

REPRÉSENTATION TEMPORELLE ET STABILITÉ



Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

NOVEMBRE 2003

MESURE DU COURT TERME

IMPLANTATION DE 2 OSCILLATEURS CRYOGÉNIQUES



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

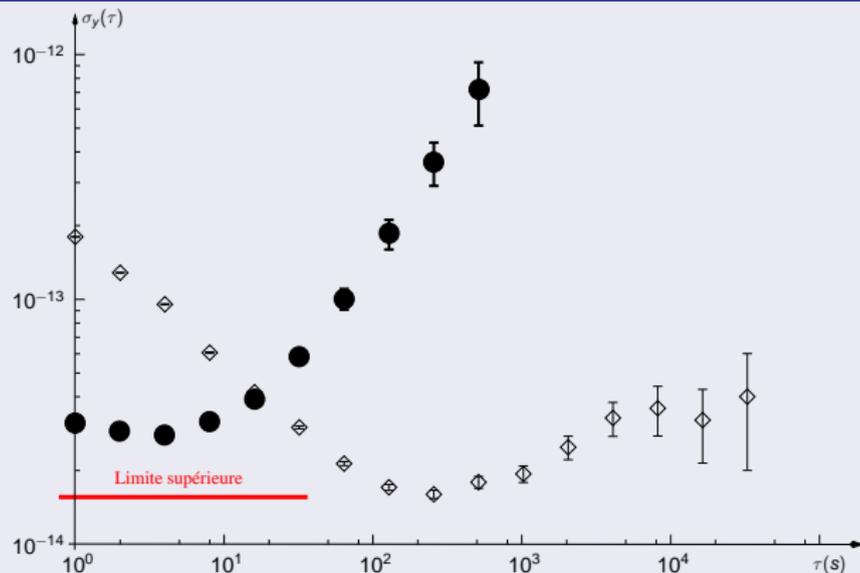
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier
RPE

Conclusion

STABILITÉ RÉSULTANT DE LA COMPARAISON DES 2 CSO



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

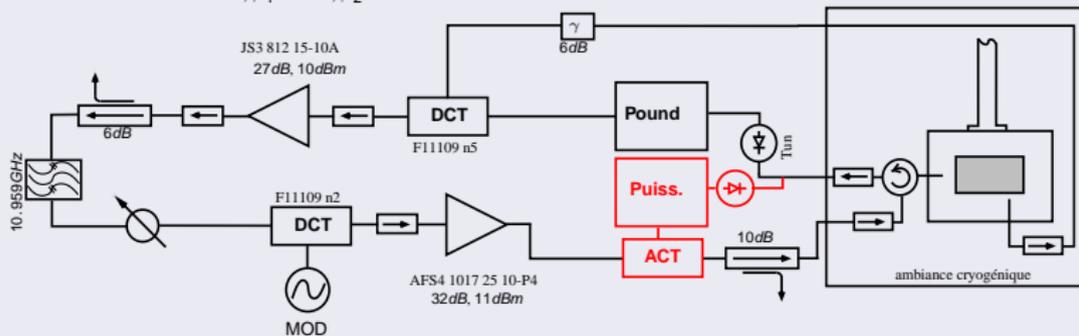
Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

MONTAGE FINAL

$WGH_{15,0,0}@10.959\text{GHz}$

$Q_L = 426 \cdot 10^6$

$I.L. = -30\text{dB}, \beta_1 = 0.6, \beta_2 = 1 \cdot 10^{-3}$



Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

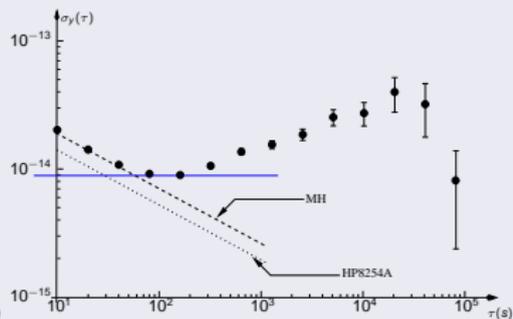
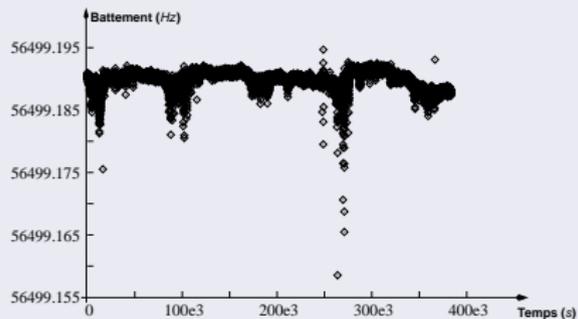
L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

REPRÉSENTATION TEMPORELLE ET STABILITÉ



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

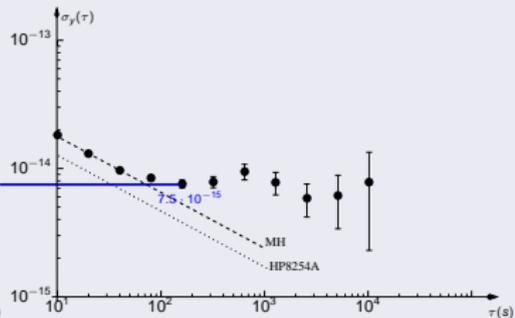
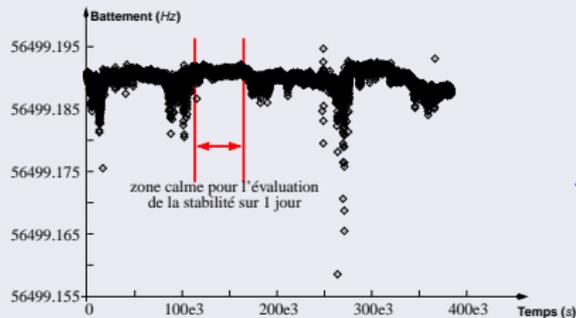
Point singulier :
RPE

Conclusion

FÉVRIER 2004

DERNIER RÉSULTAT

REPRÉSENTATION TEMPORELLE ET STABILITÉ SUR 1 JOUR



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DISPOSITIFS ET PHÉNOMÈNE ANNEXES

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

ETUDES SUPPLÉMENTAIRES

- **L.G.S.**
- Mesure d'O.U.S. à quartz
- Synthèse de fréquence
- Structure compensée saphir-rutile
- Résonance paramagnétique électronique

DISPOSITIFS ET PHÉNOMÈNE ANNEXES

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

ETUDES SUPPLÉMENTAIRES

- L.G.S.
- Mesure d'O.U.S. à quartz
- Synthèse de fréquence
- Structure compensée saphir-rutile
- Résonance paramagnétique électronique

DISPOSITIFS ET PHÉNOMÈNE ANNEXES

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

ETUDES SUPPLÉMENTAIRES

- L.G.S.
- Mesure d'O.U.S. à quartz
- Synthèse de fréquence
- Structure compensée saphir-rutile
- Résonance paramagnétique électronique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DISPOSITIFS ET PHÉNOMÈNE ANNEXES

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

ETUDES SUPPLÉMENTAIRES

- L.G.S.
- Mesure d'O.U.S. à quartz
- Synthèse de fréquence
- Structure compensée saphir-rutile
- Résonance paramagnétique électronique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

DISPOSITIFS ET PHÉNOMÈNE ANNEXES

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

ETUDES SUPPLÉMENTAIRES

- L.G.S.
- Mesure d'O.U.S. à quartz
- Synthèse de fréquence
- Structure compensée saphir-rutile
- Résonance paramagnétique électronique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

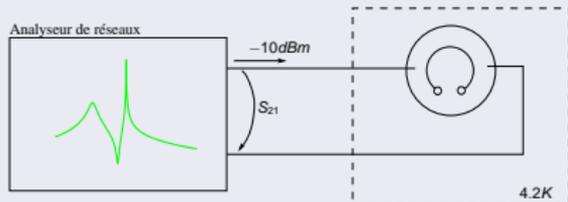
Point singulier :
RPE

Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

ETUDE DU RÉSONATEUR AUSTRALIEN



$$Q_{16} \sim 0.6 \cdot 10^9$$

$$Q_{17} \sim 0.7 \cdot 10^9$$

$$Q_{18} \sim 10^9$$

$$WGH_{17,0,0} : \beta_1 = 0.4; \beta_2 = 10^{-2}; IL = -20\text{dB}$$

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

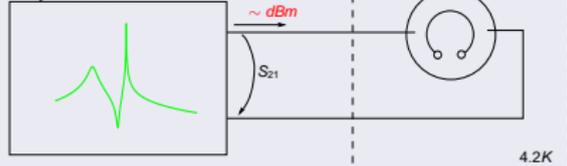
Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

ETUDE DU RÉSONATEUR AUSTRALIEN

Analyseur de réseaux



$$Q_{16} \sim 0.6 \cdot 10^9$$

$$Q_{17} \sim 0.7 \cdot 10^9$$

$$Q_{18} \sim 10^9$$

$$WGH_{17,0,0} : \beta_1 = 0.4; \beta_2 = 10^{-2}; IL = -20dB$$



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

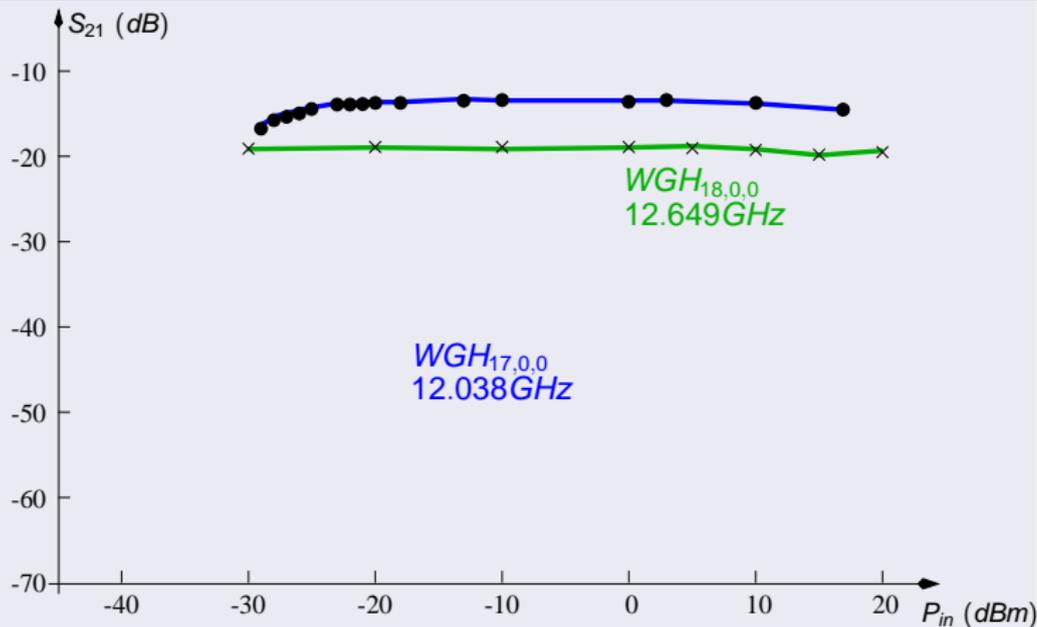
Point singulier :
RPE

Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

ANALYSE MINUTIEUSE DES MODES



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

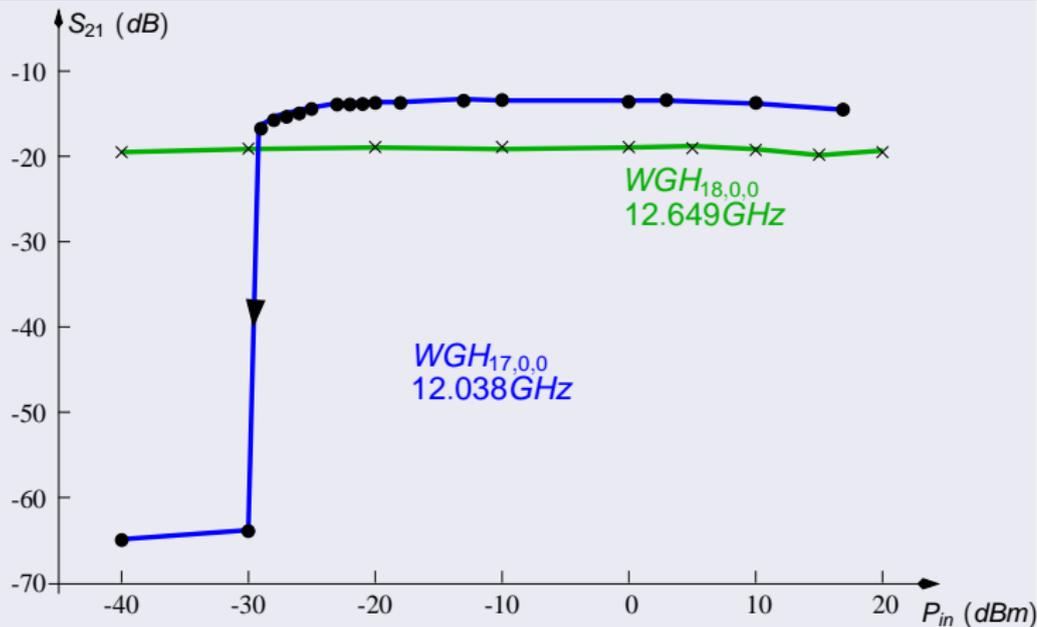
Point singulier :
RPE

Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

ANALYSE MINUTIEUSE DES MODES



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

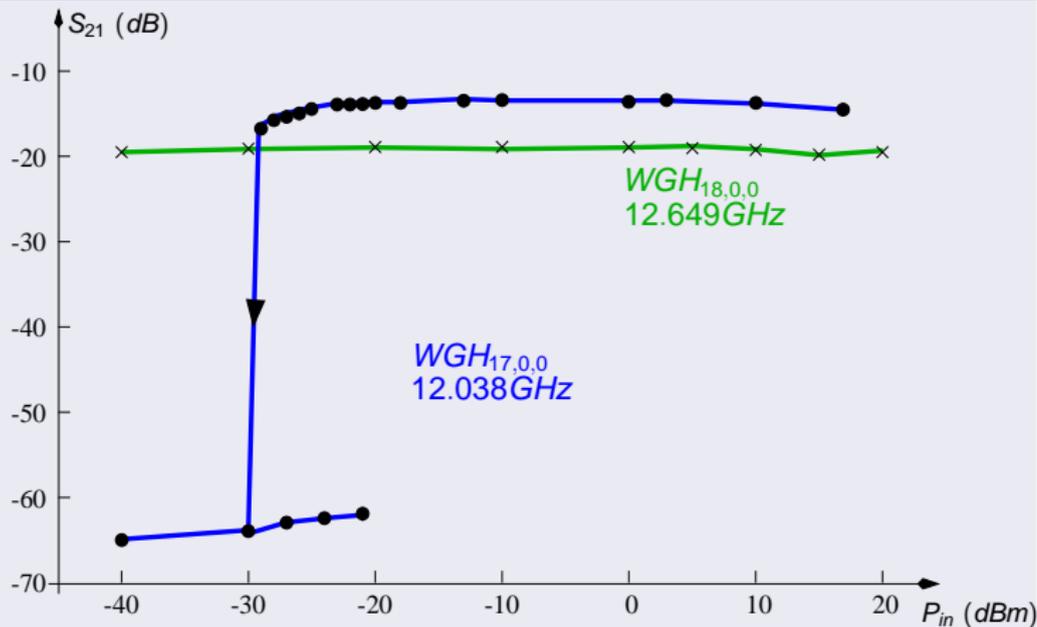
Point singulier :
RPE

Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

ANALYSE MINUTIEUSE DES MODES



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

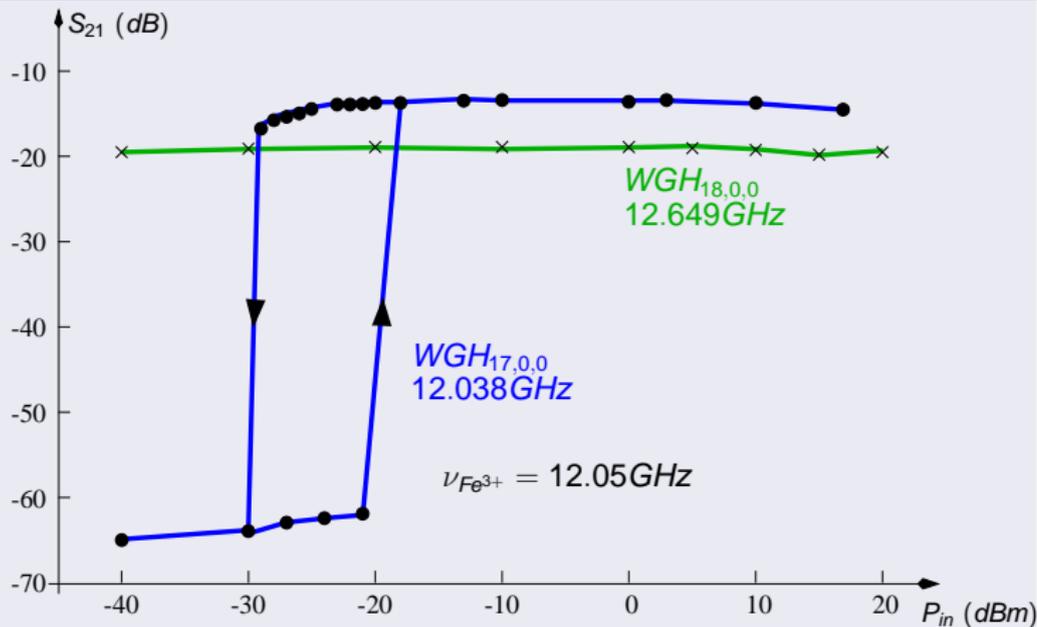
Point singulier :
RPE

Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

ANALYSE MINUTIEUSE DES MODES



Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

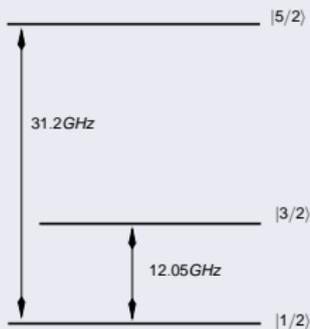
Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

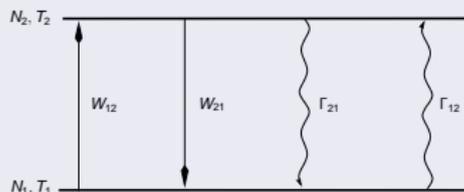
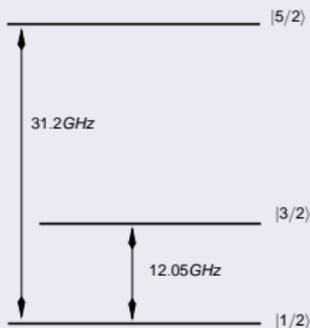
Conclusion



RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique



$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{h\nu_0}{2k_B T} \sim 7 \cdot 10^{-2} @ 4K$$

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

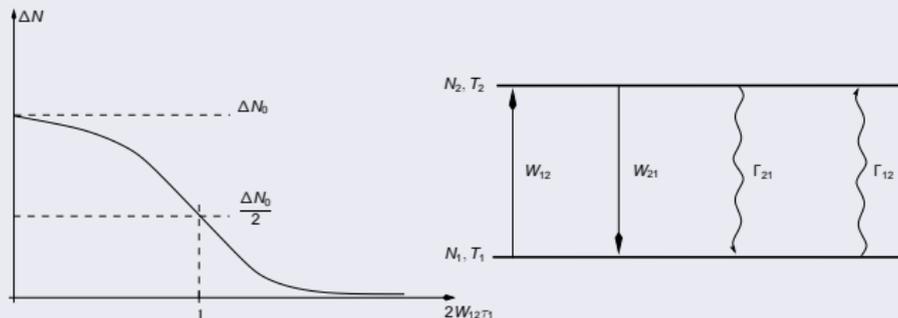
Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

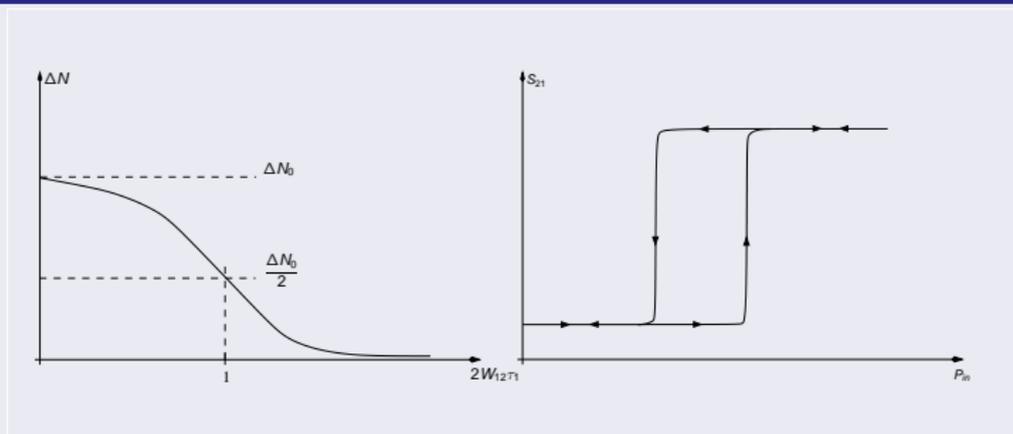
Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

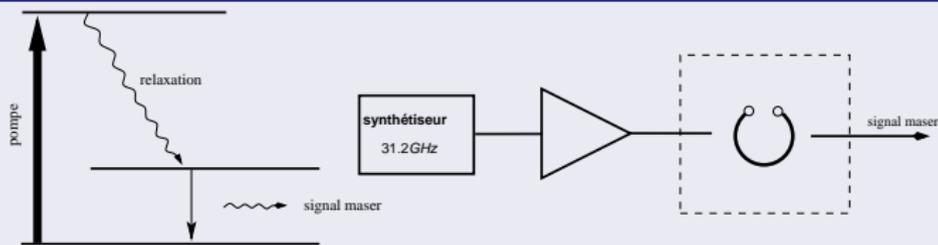


RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

BISTABILITÉ DU RÉSONATEUR

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

APPLICATION POSSIBLE : MASER



Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

CONCLUSION

- démonstration des potentialités du saphir cryogénique
- suppression totale des modes parasites (cavité ouverte)
- obtention d'une instabilité relative de fréquence meilleure que $7.5 \cdot 10^{-15}$ sur le court terme
- instabilité relative de fréquence jamais atteinte sur le long terme ($< 2 \cdot 10^{-14}$ /jour)

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

AMÉLIORATIONS

- système de régulation thermique
- finalisation des électroniques d'asservissement
- détecteurs dans le froid
- tests de nouveaux cristaux
- expérience de physique fondamentale

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien et à la collaboration de plusieurs organismes :

- C.N.E.S.
- B.N.M.
- I.R.C.O.M.
- U.W.A.
- N.P.L.

Référence
Secondaire
de Fréquence
à Résonateur
Saphir
Cryogénique

Spécifications
préalables

Limites de la
stabilité de
fréquence

Le résonateur

L'oscillateur

Résultats
d'expériences

Point singulier :
RPE

Conclusion



Référence Secondaire de Fréquence à Résonateur Saphir Cryogénique

merci

Institut FEMTO-ST, département LPMO-CNRS
Université de Franche-Comté

13 décembre 2004



- Pourquoi dével. ref secondaire ? (2)
- Différentes références de fréquence (3)
- Etat de l'Art (4)
- Formule de Leeson (5)
- Bruit thermique (6)
- Bruit flicker (7)
- Propagation des rayons dans le saphir (9)
- Structure des modes dans le saphir (10)
- Raisons pour utiliser le saphir (12)
- Cavité fermée->modes parasites (13)
- Cavité ouverte vs fermée (14)
- Cavité ouverte asymptote (15)
- Insert cryo (16)
- Oscillateur cryo (17)
- Difficultés dégénérescence (18)
- Sensibilité phase (19)
- Sensibilité puissance (20)
- Réglage point d'inversion (21)
- Juin 2002 structure (22)
- Juin 2002 stabilité (23)
- Janvier 2003 structure (24)
- Janvier 2003 mesure (25)
- Janvier 2003 stabilité (26)
- Février 2003 structure (27)
- Février 2003 stabilité (28)
- Novembre 2003 montage (29)
- Novembre 2003 stabilité (30)
- Mesure du court terme (photo) (31)
- Mesure du court terme (stabilité) (32)
- Fevrier 2004 montage (33)
- Fevrier 2004 stabilité (34)
- Fevrier 2004 stabilité sur 1 jour (35)
- Liste dispos annexes (36)
- RPE-photo (37)
- RPE-threshold (38)
- RPE-Analyse minutieuse modes (39)
- RPE-Niveaux d'énergie Fe^{3+} (41)
- RPE-Evolution $\Delta N Fe^{3+}$ (43)
- RPE-Application maser $\Delta N Fe^{3+}$ (44)
- Conclusion (45)
- Améliorations (46)