

Oscillateurs à quartz stabilisés

J.-M Friedt (Sensor, Besançon)

(avec l'aide de l'équipe temps-fréquence du Laboratoire de Physique
et Métrologie des Oscillateurs, FEMTO-ST, Besançon)

copie des transparents et références à <http://jmfriedt.free.fr/>

11 février 2008

Problème ...

Comment synchroniser deux événements ?

- Je possède un système de positionnement par GPS et un appareil photo numérique. Comment localiser mes photos ?
- Réponse : asservir l'horloge la moins précise (l'appareil photo) sur une référence (le GPS).
- Dans la suite de cette présentation, nous **supposerons** que le GPS fournit une référence de temps *parfaite*.
- La référence "réelle" est la définition de la seconde : une seconde est 9192631770 oscillations de la transition ^{133}Cs .
- Cependant, le GPS ne rafraîchit son information de temps que 1 fois par seconde.

Comment synchroniser des dispositifs rapides (quelques MHz), distants, afin de conserver une synchronisation á long terme.

Synchronisme

- Un dispositif de facteur de qualité élevé est stable à court terme.
- Il est cependant affecté par les variations de son environnement à long terme.
- Notion de stabilité en fonction d'un intervalle de temps : variance d'Allan ¹ ². Les différents types de bruits sont identifiés par leur loi de puissance
- On utilise classiquement le bruit de phase ($\text{kHz} < f < \text{Hz}$) ou la stabilité en fréquence ($1 \text{ s} > \tau > 10^x \text{ s}$) pour caractériser la stabilité d'un oscillateur relativement à une référence.

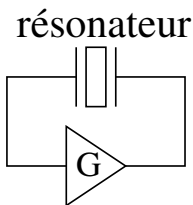
¹F. Vernotte, *Stabilité temporelle et fréquentielle des oscillateurs : modèles*, Tech. Ingé. R680 (2006)

²F. Vernotte, *Stabilité temporelle et fréquentielle des oscillateurs : outils d'analyse*, Tech. Ingé. R681 (2006)

L'oscillateur

Un oscillateur est composé

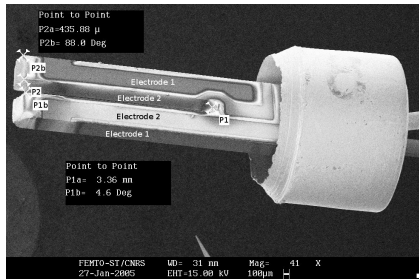
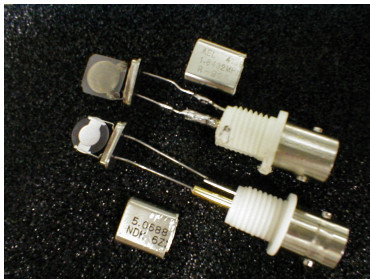
- un résonateur définissant la stabilité de l'oscillateur en sélectionnant la fréquence d'oscillation (caractéristique : Q)
- un amplificateur chargé de compenser les pertes dans le résonateur (caractéristique : puissance, facteur de bruit)
- des composants annexes (filtre passe bande, déphaseur) garantissant l'oscillation



Condition de Barkhausen : le déphasage dans la boucle est multiple de 2π , les gains compensent les pertes.

Dérives de l'oscillateur

- Stabilité court terme est associée aux très grands facteurs de qualité
- La fréquence de résonance est déterminée par la *géométrie* du résonateur
⇒ sensibilité aux fluctuations de température, accélération, champ magnétique, rayonnements ionisant etc ...



Choix du résonateur

- Le résonateur est classiquement réalisé en matériau piézoélectrique car permet d'obtenir des composants équivalents (RLC) impossibles à obtenir par composants passifs.
- Choix du quartz pour sa disponibilité, faibles pertes acoustiques et présence de coupes compensées en température
- Exemple du diapason à quartz

32 kHz, $R_1 = 16 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 2.56 \text{ fF}$, $L_1 = 9.23 \text{ kH}$, $C_0 = 1.51 \text{ pF}$

Cas qui nous intéresse : résonateur HF, par exemple quartz à 2 MHz

$R_1 = 100 \text{ }\Omega$, $C_1 = 0.012 \text{ pF}$, $L_1 = 520 \text{ mH}$, $C_0 = 4 \text{ pF}$ pour $Q = 18000$ ³

Cas qui nous intéresse : résonateur HF, par exemple céramique à 4 MHz

$R_1 = 8 \text{ }\Omega$, $C_1 = 4.4 \text{ pF}$, $L_1 = 385 \text{ }\mu\text{H}$, $C_0 = 36.3 \text{ pF}$ pour $Q = 1200$ ⁴

- Le tirage du résonateur est par définition la possibilité de faire varier la fréquence de résonance par la capacité de charge :

$$D_L = \frac{C_1 \times 10^6}{2(C_0 + C_L)} \text{ ppm}^5$$

³<http://www.rakon-europe.co.uk/markets/resonators.php>

⁴<http://www.abracon.com/Support/appendix-a.pdf>

⁵<http://www.crovencrystals.com/crystalfacts.htm>

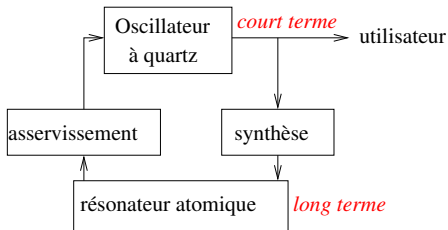
Élimination des dérives de l'oscillateur

Première stratégie :

- OCXO : éliminer les sources de fluctuations associées aux variations de température en la mesurant

Cependant, l'oscillateur reste une source *relative* aux sources primaires. La définition de la seconde est donnée par le Cs.

- Seconde stratégie : asservir l'oscillateur à quartz sur un signal stable à long terme ⁶



⁶V. Giordano, *Génération de fréquence*, Tech. Ingé. R.682, à paraître

Oscillateur asservi

Définition du problème

Définition d'un oscillateur

Oscillateur asservi

Outils de caractérisation

Implémentation de ces concepts

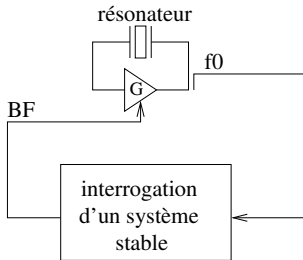
Résultats expérimentaux

Au-delà du GPS

...

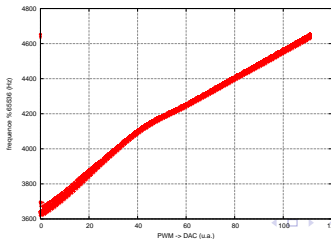
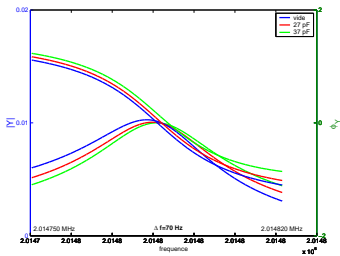
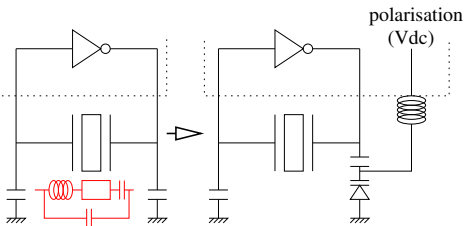
Deux constantes de temps :

- 1 un oscillateur stable à court terme, mais qui dérive sous l'influence de perturbation de l'environnement
- 2 une grandeur physique longue à interroger, mais fournissant la stabilité à long terme (transition optique ou microconde dont le signal d'interrogation est issu de l'oscillateur à quartz)
- 3 entre les deux, un algorithme d'asservissement



Tirage de la fréquence

- Condition de Barkhausen nécessite rotation de phase de $2n\pi$
- Rotation de phase par condensateurs de pieds
- En variant un de ces condensateurs, on varie la fréquence de résonance



Caractérisation de la stabilité d'un oscillateur

Définition du problème

Définition d'un oscillateur

Oscillateur asservi

Outils de caractérisation

Implémentation de ces concepts

Résultats expérimentaux

Au-delà du GPS ...

La variance d'Allan ⁷ :

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}$$

pour M mesures de la série temporelle y régulièrement distribuées dans des segments de τ secondes

$$y_n = \left\langle \frac{\delta f}{f} \right\rangle_n = \frac{1}{\tau} (x_{n+1} - x_n)$$

pour une erreur de fréquence δf autour de f), ou des mesures x_n d'intervalles de temps.

⁷Allan, D. & J. Barnes, *A Modified "Allan Variance" with Increased Oscillator Characterization Ability*, Proc. of the 35th Annual Frequency Control Symposium. (1981) 470-475.

<http://www.ieee-uffc.org/freqcontrol/paper1ht.html>

<http://www.allanstime.com/AllanVariance/>

Propriété de la variance d'Allan

Concrètement,

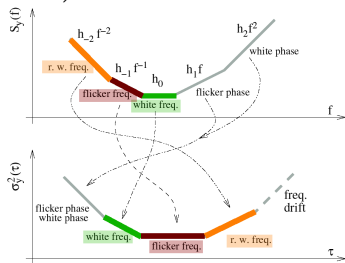
$$\sigma_y^2(\tau_0) = \frac{1}{2(M-1)} \left((y_2 - y_1)^2 + (y_3 - y_2)^2 + \dots + (y_M - y_{M-1})^2 \right)$$

$$\sigma_y^2(2\tau_0) = \frac{1}{2(M-3)} \left(\left(\frac{y_3 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_2}{2} \right)^2 + \left(\frac{y_4 + y_5}{2} - \frac{y_2 + y_3}{2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{y_{M-1} + y_M}{2} - \frac{y_{M-3} + y_{M-2}}{2} \right)^2 \right)$$

$$\sigma_y^2(M/2 \times \tau_0) = \frac{1}{2} \left(\frac{y_{M/2+1} + \dots + y_M}{M/2} - \frac{y_1 + \dots + y_{M/2}}{M/2} \right)^2$$

Les diverses lois de puissance de $\sigma_y(\tau)$ permettent une identification de la nature du bruit affectant l'oscillateur

<http://www.femto-st.fr/~rubiola/slides/leeson-effect-slides2006.pdf>



Oscillateur asservi sur GPS

- Une transition atomique n'est pas communément disponible.
- Divers signaux issus d'horloges atomiques sont disponibles sur faisceaux hertziens : synchronisation de télévision, France Inter, LORAN, GPS
⇒ problème de vue d'un émetteur commun, des réflexions multiples sur l'ionosphère.
- Nous allons nous servir du GPS : disponibilité, simplicité.

Récepteurs GPS

- Tous les récepteurs GPS sont basés sur une détermination précise de temps de vol de signaux RF, donc un oscillateur local stabilisé sur les signaux issus des satellites.
- Beaucoup de récepteurs fournissent un signal nommé 1 PPS dont le front montant se répète précisément à 1 Hz

MOTOROLA VP ONCORE™ Product Specifications

JUNE 4, 1996

General Characteristics	Receiver Architecture	<ul style="list-style-type: none"> • 8 Channel Parallel • L1 1575.42 MHz • C/A code (1.023 MHz chip rate) • Code plus carrier tracking (carrier aided tracking)
	Tracking Capability	<ul style="list-style-type: none"> • 8 simultaneous satellite vehicles
Performance Characteristics	Dynamics	<ul style="list-style-type: none"> • Velocity: 1000 knots (515 M/S) >1000 knots at altitudes <60,000 ft. • Acceleration: 4 g • Jerk: 5 m/s³ • Vibration: 7.7G per Military Standard 810E
	Acquisition Time Time to First Fix (TTFF)	<ul style="list-style-type: none"> • 20 sec. typical TTFF (w/current almanac, pos., time and ephemeris) • 45 sec. typical TTFF (w/current almanac, position and time) • 2.5 seconds typical reacquire
	Positioning Accuracy	<ul style="list-style-type: none"> • Less than 25 Meters, SEP without SA (DOD may invoke Selective Availability (SA), potentially degrading accuracy to 100 m (2dRMS) • DGPS accuracy 1-5 Meters (typical)
	Timing Accuracy 1 Pulse per Second (1PPS)	<ul style="list-style-type: none"> • 130 nanosecond observed (1σ) with SA on • In position hold mode, <50 nanoseconds observed (1σ) with SA on

Implémentation de ces concepts

Un récepteur GPS Motorola GPS Oncore VP

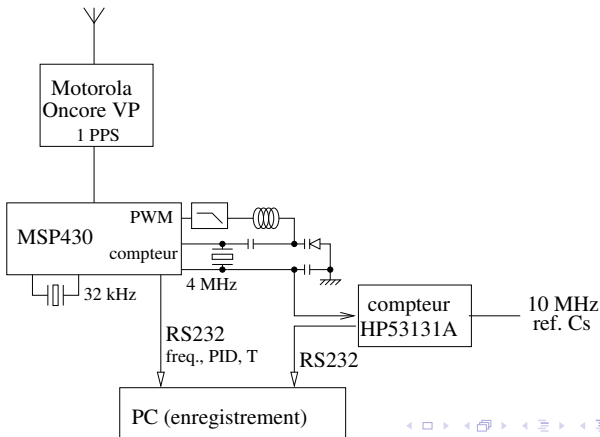
Un microcontrôleur MSP430 possédant 2 oscillateurs indépendants ⁸

- un résonateur RF est équipé d'une varicap sur un de ses bras : appliquer un potentiel BF change la capacité et contrôle la fréquence d'oscillation
- un compteur 16 bits du microcontrôleur mesure la fréquence d'un oscillateur RF
- un asservissement PI calcule la rétroaction à appliquer sur PWM afin de tirer la fréquence du quartz vers la consigne
- l'ensemble des opération est séquencé par le 1 PPS du GPS

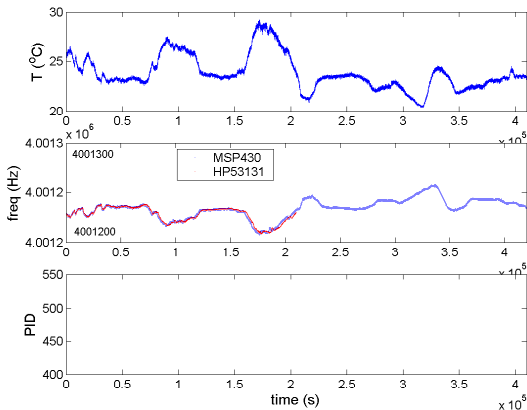
⁸J.-M. Friedt, A. Masse, F. Bassignot, *Les microcontrôleurs MSP430 pour les applications faibles consommations – asservissement d'un oscillateur sur le GPS.*, GNU/Linux Magazine France 98, October 2007

Méthode expérimentales

- Un compteur de fréquence HP53131A piloté par une horloge au Cs (10 MHz)
- Un récepteur GPS Motorola Oncore VP
- Un microcontrôleur MSP430 avec deux oscillateurs, un (BF) pour le cœur chargé des calculs et l'autre pour le compteur (HF)



1. Analyse en boucle ouverte



- 1 Les fluctuations de température sont la principale source de dérive
- 2 Absence d'asservissement : la fréquence d'oscillation traduit directement la température
- 3 Sensibilité de l'ordre de 1 ppm/K autour de 25 °C

2. Analyse en boucle fermée

Définition du problème

Définition d'un oscillateur

Oscillateur asservi

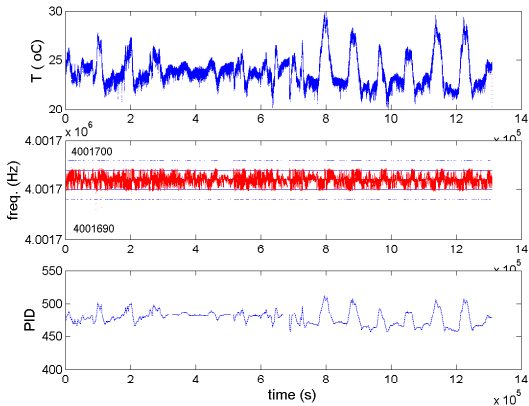
Outils de caractérisation

Implémentation de ces concepts

Résultats expérimentaux

Au-delà du GPS

...

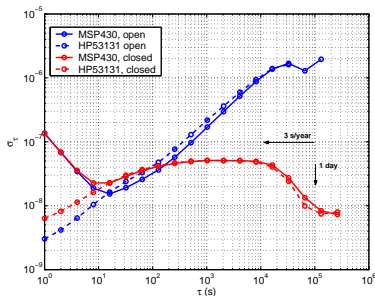
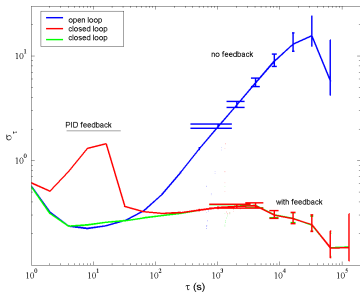


- ① asservissement fonctionnel : les fluctuations de température ne sont plus visibles sur la fréquence
- ② la commande de l'asservissement traduit la température de façon très précise : capteur de température !⁹

⁹http:

[//www.iap.tuwien.ac.at/www/qxsens/0809_P3_03_PHDSUM_RVELCHEVA.PDF](http://www.iap.tuwien.ac.at/www/qxsens/0809_P3_03_PHDSUM_RVELCHEVA.PDF)

3. Variance d'Allan



variance sur variation freq. Δf

variance relative de freq. $\Delta f/f$

- 1 Sensibilité aux point erronés et à la présence de la phase d'asservissement
- 2 Observation du bruit associé au compteur direct ($\Delta n = \pm 1 \Rightarrow erreur = \frac{1}{\nu_s T_c}$ où $T_c = 1$ s, soit $2,5 \times 10^{-7}$ à 1 s ou $2,5 \times 10^{-8}$ à 10 s)
- 3 Calcul par <http://www.alamath.com/> (Alavar 5.2) ou avar pour Matlab (long ...), allan v1.5 sur <http://www.mathworks.com/matlabcentral>

Applications

- Magnétomètre à précession de protons : mesurer une fréquence à quelques mHz pour observer les fluctuations du champ magnétique terrestre
- Interférométrie large base : synchroniser les mesures de capteurs distant (récepteurs RF).

Exemples : localisation d'orages ¹⁰, détection de pluies de particules cosmiques énergétiques ¹¹

Exemple : un PC portable chargé de récupérer des images satellites au Spitsberg voit son horloge dériver de 7 s/jour (81 ppm) et acquiert des signaux sur carte son à 11045 Hz au lieu des 11025 nominaux (1810 ppm).

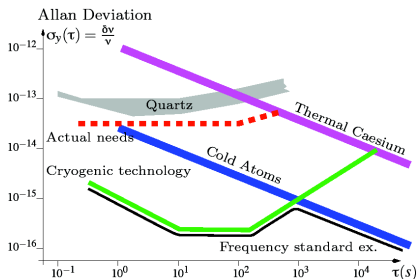
```
6 Feb 00:05:10 ntpdate[31217]: step time server 193.52.184.106 offset 7.214508 sec
7 Feb 00:05:11 ntpdate[14948]: step time server 193.52.184.106 offset 7.249851 sec
8 Feb 00:05:10 ntpdate[32125]: step time server 193.52.184.106 offset 7.278233 sec
9 Feb 00:05:13 ntpdate[32696]: step time server 193.52.184.106 offset 7.304753 sec
```

¹⁰<http://sifnos.engr.uconn.edu/index.html>

¹¹<http://www.obs-besancon.fr/www/tf/tf.html>

Au-delà du GPS ...

- la stabilité du GPS vient des horloges atomiques embarquées ¹², 2 Cs et 2 Rb
- quels seront les successeurs aux horloges atomiques? Quel phénomène physique fournit une meilleure stabilité et reproductibilité qu'une transition atomique?
- nécessité de la stabilité long terme (communication ¹³, synchronisation, tests de physique fondamentale ...) et court terme (radar)

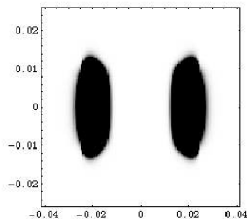
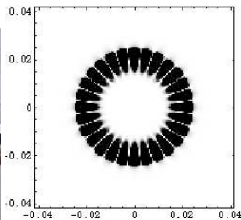
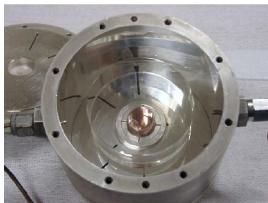


¹²<http://tycho.usno.navy.mil/gpstt.html>

¹³M.A. Lobardi, C. Norman & W.J. Walsch, *The Role of LORAN Timing in Telecommunications*, disponible à www.loran.org/news/Loran%20NIST%20RTC%20Paper%202006.pdf

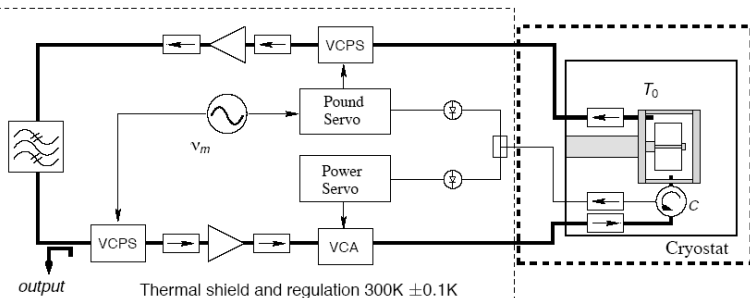
Équipe temps-fréquence de FEMTO-ST

- oscillateur à résonateur saphir cryogénique, $\varepsilon_r \simeq 10$
- très faibles pertes, $Q \simeq 2 \times 10^5$ à l'ambiante, 40×10^6 à 77 K et 10^9 à 4 K
- température d'inversion autour de l'hélium liquide \Rightarrow stabilisation en température (dépendant des impuretés Ti^{3+} ou multicouches)
- mode de galerie d'ordre élevé $WGM_{m,n,l}$, $m = 14$, $n = l = 0$ avec $2m$ nœuds par tour
- couplage par boucle magnétique ou antenne (diélectrique)



50 mm × 30 mm

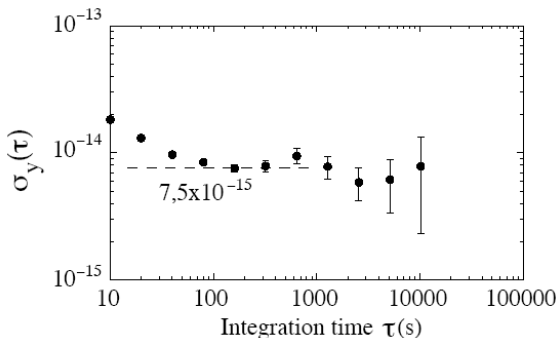
Résultats : oscillateur cryogénique à mode de galerie



- Record de stabilité : 7×10^{-15} à court terme, 2×10^{-14} sur une journée pour $m = 16$
- Fonctionnement à 10,959 GHz

+ étude sur les amplificateurs à faible bruit de phase pour garantir stabilité court terme (kHz de la porteuse)

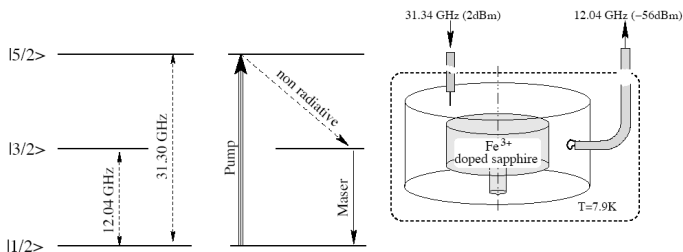
Résultats : oscillateur cryogénique à mode de galerie



- Record de stabilité : 7×10^{-15} à court terme, 2×10^{-14} sur une journée pour $m = 16$
- Fonctionnement à 10,959 GHz

+ étude sur les amplificateurs à faible bruit de phase pour garantir stabilité court terme (kHz de la porteuse)

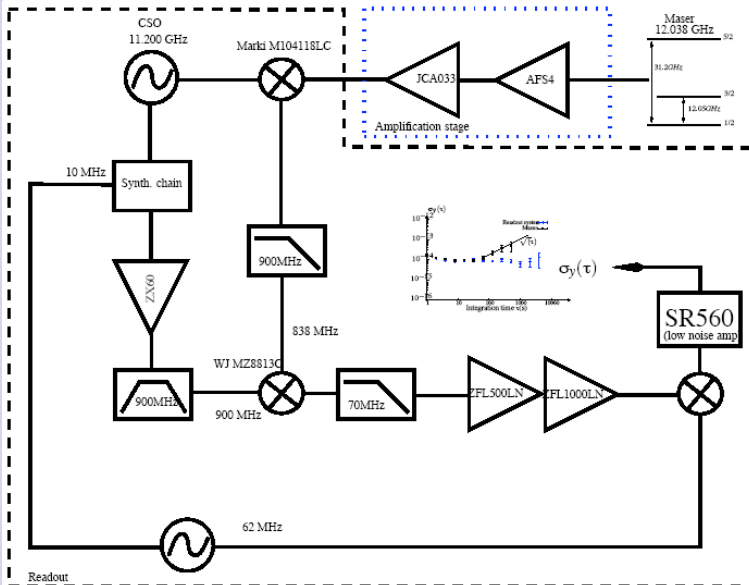
Résultats : MASER



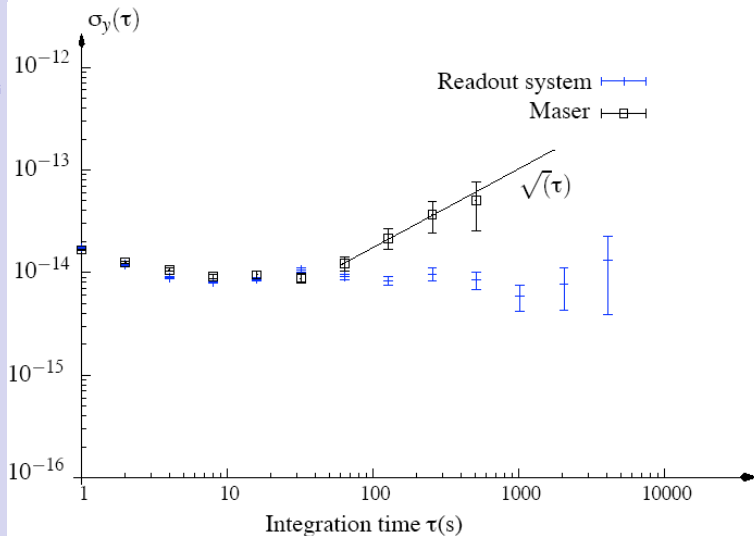
- Présence de Fe^{3+} permet une inversion de population par la présence d'un système 3 niveaux (FEMTO-ST, 2004)
- pompe à 31,30 GHz pour rendre le système amplificateur d'une onde à 12,04 GHz
- \Rightarrow simplification de l'électronique puisque l'oscillateur s'auto-entretient, moins d'asservissements

- bruit limité par les effets thermiques $S_{\varphi} = \frac{k_B T}{P}$ i.e. $\sigma_y(\tau) = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{k_B T}{2P\tau}}$
ou $1,5 \times 10^{-16} \tau^{-1/2}$ à $Q = 5 \times 10^8$ et $T = 4,2$ K.
- démonstration du concept : stabilité de $2,5 \times 10^{-14}$ à court terme

Résultats : MASER



Résultats : MASER



Conclusion

- exemple d'asservissement représentatif d'un des nombreux contrôles réalisés sur une horloge atomique (température, champ magnétique, fréquence)
- capacité à distribuer une référence de temps stable sur une large base
- peu encombrant et faible coût, consommation de l'ordre de grandeur d'un OCXO, mais sans la dérive long terme (vieillessement)
- introduction aux asservissements “modernes” des sources de fréquence stables à long terme