

# Projet : asservissement numérique d'un oscillateur à quartz

É. Carry, J.-M Friedt

jmfriedt@femto-st.fr

transparents à jmfriedt.free.fr





## Description

- Industry standard SMD crystal  
Resistance welded, hermetically sealed in an inert atmosphere, glass to metal seals on leads  
Lead wires are mounted onto a plastic former to create a gull wing mount

- Model HC49/4HSMX
- Model Issue number 17

## Frequency Parameters

- Frequency 10.0MHz
- Frequency Tolerance @ 25°C ±30.0ppm
- Frequency Stability ±50.0ppm
- Operating Temperature Range -10.0 to 60.00°C
- Overtone Order Fundamental
- Ageing ±5ppm typ per year @ 25°C

## Electrical Parameters

- Load Capacitance (C<sub>L</sub>) 30.00pF
- Shunt Capacitance (C<sub>0</sub>) 7pF max
- Drive Level 500μW max
- ESR 40Ω max

## Environmental Parameters

- Shock: 98.1m/s<sup>2</sup>, 6ms, 3 times in each of 3 mutually perpendicular planes
- Vibration: 10Hz-60Hz, 0.75mm amplitude, 60Hz-500Hz, 98.1m/s<sup>2</sup>, 30mins in 3 mutually perpendicular planes
- Storage Temperature Range: -55 to 125°C

## Compliance

- RoHS Status Compliant
- REACH Status Compliant
- MSL Rating (JDEC-STD-033): Not Applicable

## Packaging

- Pack Type: Reel Tape & reel in accordance with EIA-481-D 1,000
- Alternative packing option available

This document is correct at the time of printing; please contact your local office for the latest version.

## Crystal Specification

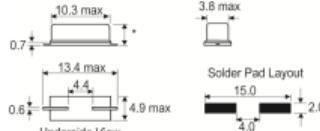
Part No. + Packaging: LFXTAL017145REEL



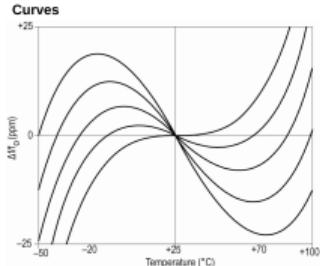
## Outline (mm)



- \* Package Height Options
  - HC49/4HSMX 4.3mm max
  - HC49/3.5HSMX 3.7mm max
  - HC49/3HSMX 3.1mm max
  - HC49/2.5HSMX 2.85mm max



## Typical Frequency vs Temperature Curves



## Problématique :

- un **résonateur** à quartz sélectionne une fréquence selon des conditions géométriques d'un barreau de quartz vibrant ...
- ... dépendant de son environnement physique (température, contrainte, vieillissement ...)
- un **oscillateur** à quartz présente donc une fréquence de sortie **variable**.

Nous désirons **identifier** cet écart à la fréquence nominale et le **corriger**.

# Objectifs du projet

- **Le concept** : un oscillateur asservi sur une source stable (1 PPS du GPS – *GPS disciplined oscillator*<sup>1 2</sup>)
- **L'étude** : correction en fréquence de l'oscillateur à quartz cadençant un microcontrôleur
- **La réalisation** : schéma et routage d'un circuit autour d'un Atmega32U4
- **Démonstration** expérimentale de la réalisation

Applications : synchronisation de mesures sur des bases étendues (interférométrie<sup>3</sup> :  $1 \mu\text{s} = 300 \text{ m}$ ), synchronisation de transactions et acquisition de capteurs distribués<sup>4</sup>, *smart grid*



1. <http://www.microsemi.com/products/timing-synchronization-systems/embedded-timing-solutions/modules/gps-disciplined-oscillators>

2. J.-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, Octobre 2007

3. E.N. Anagnostou, D.P. Lalas, *National Observatory of Athens Long-Range Lightning Detection System*, <http://www.zeus.iag.usp.br/pub/publications/a102.pdf>

4. [teams.femto-st.fr/equipe-cosyma/new-joint-lab-gorgy-timing](http://teams.femto-st.fr/equipe-cosyma/new-joint-lab-gorgy-timing) & [anr.fr/Projet-ANR-17-LCV2-0003#](http://anr.fr/Projet-ANR-17-LCV2-0003#)

# Exemple de projet libre : “Lady Heather’s Disciplined Oscillator Control Program”<sup>5</sup>

<http://www.ke5fx.com/heather/readme.htm>

“This program monitors and controls the operation of various GPS-disciplined frequency standards.”

## *Lady Heather’s Disciplined Oscillator Control Program*

This program monitors and controls the operation of various GPS-disciplined frequency standards.

[Download Lady Heather V5.00 \(Windows\)](#)

[Download previous release of Lady Heather](#)  
(V3.10 of June 18, 2012, Windows setup program)

[Linux build instructions \(readme.txt\) for beta version](#)

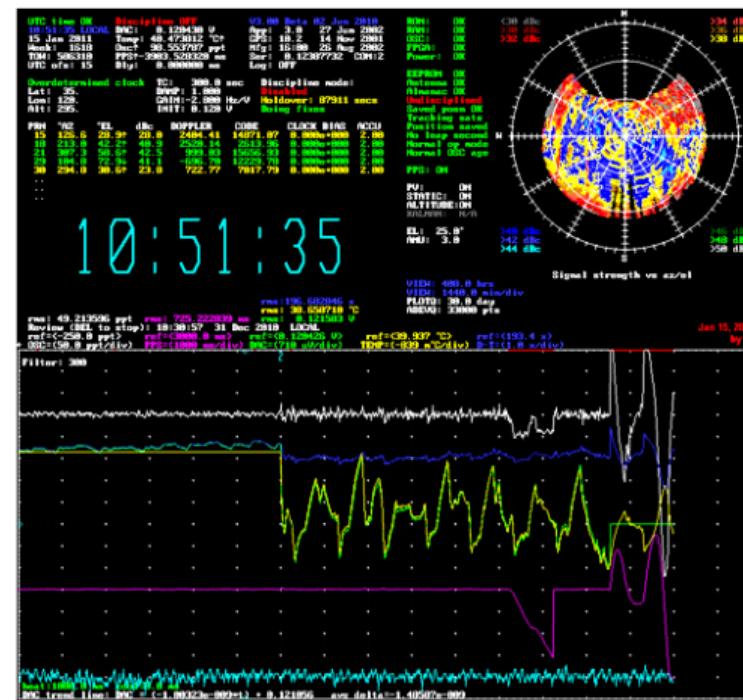
[Zipfile for Linux and other OSes; see readme.txt above](#)

Copyright (C) 2008-2016 Mark S. Sims - all rights reserved  
Permission granted for free noncommercial use and distribution

Win32 translation and TCP/IP server by John Miles, KE5FX  
C++ sources and makefile will be installed in the same directory as the Windows executable.

Allan deviation code adapted from Tom Van Baak’s [adev1.c](#)  
Temperature and oscillator control algorithms by Warren Sarkinson  
Easter and moon-phase code from [voidware.com](#)  
See the .PDF document linked below for further credits.

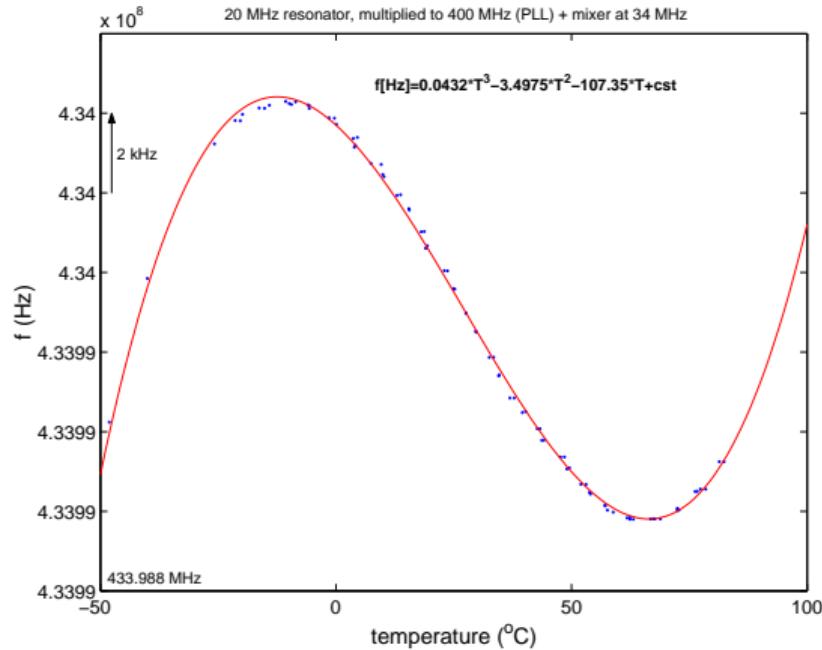
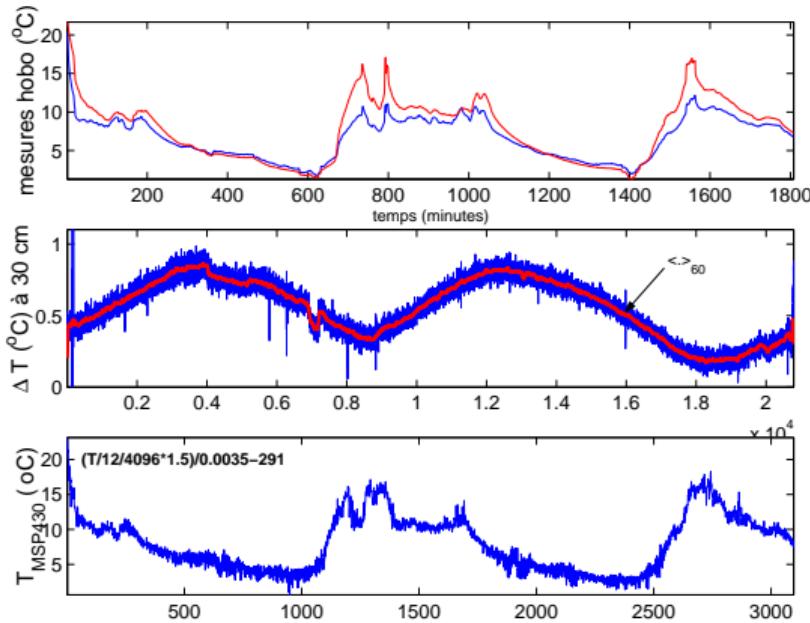
*Some brief release notes...*



<sup>5</sup> Heather now has some sparse user documentation. Check the heather.pdf file under <https://github.com/jkingan/ladyheather>

## Exemple d'instabilité de l'oscillateur local

- Un oscillateur de référence présente une stabilité court terme ( $<100$  s) de  $10^{-9} - 10^{-10}$  sous un environnement contrôlé stable
- En pratique, un système embarqué est soumis à de larges fluctuations de l'environnement



Gauche : mesure de température extérieure et en sous-sol pendant 2,5 jours (1 mesure/min)

Droite : oscillateur de référence (20 MHz), multiplié à 433 MHz, en fonction de la température

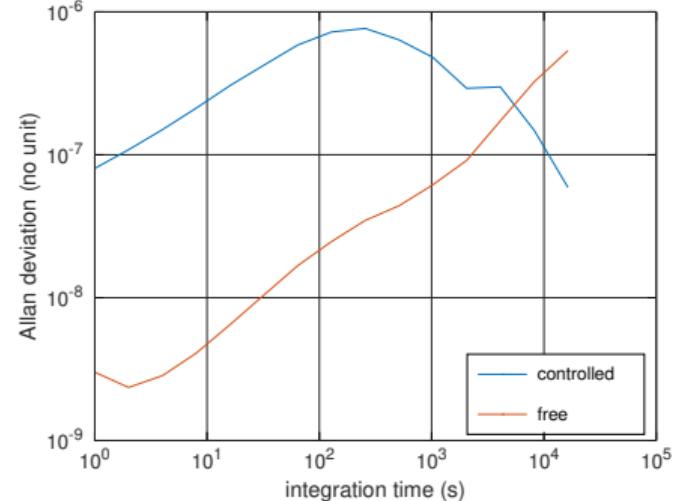
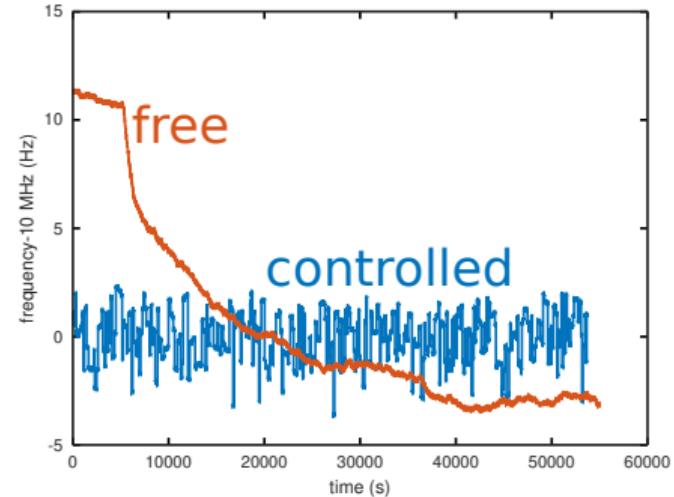
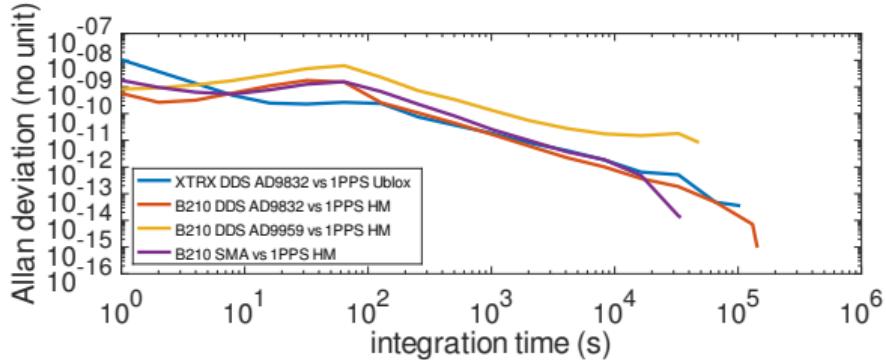
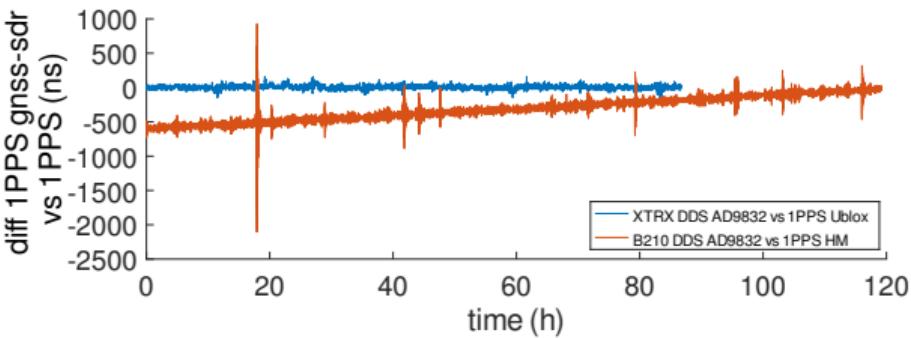
# Principe de la variance d'Allan

Écart type en fonction du temps sur lequel les mesures

sont moyennées :  $\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (y_{n+1} - y_n)^2 \rangle$  avec  $y_i = \frac{x(iT+\tau)-x(iT)}{\tau}$ ,  
 $i \in \mathbb{N}$

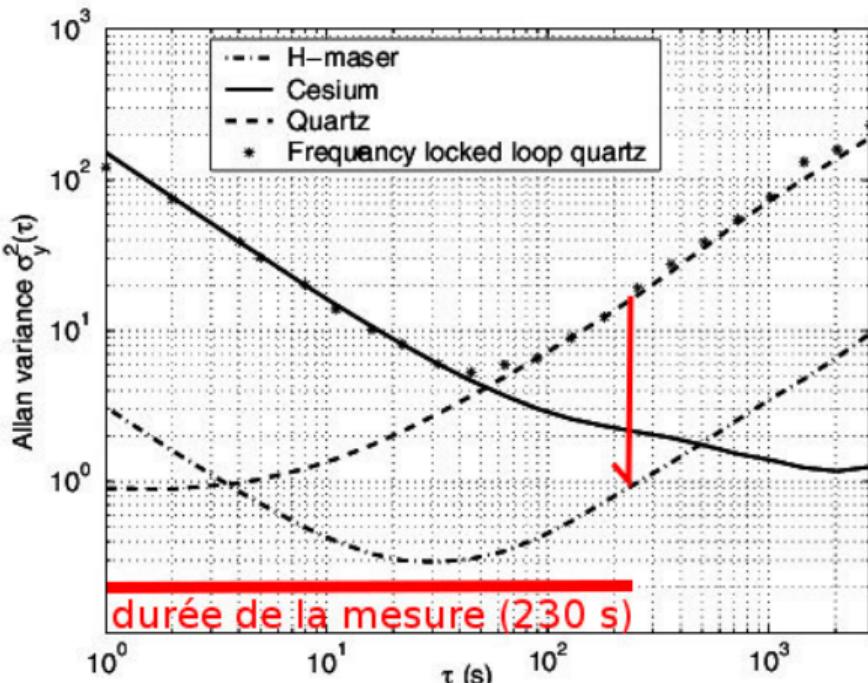
Haut : évolution temporelle de la fréquence

Bas : variance d'Allan (<https://gitlab.com/sigmatheta1/>)

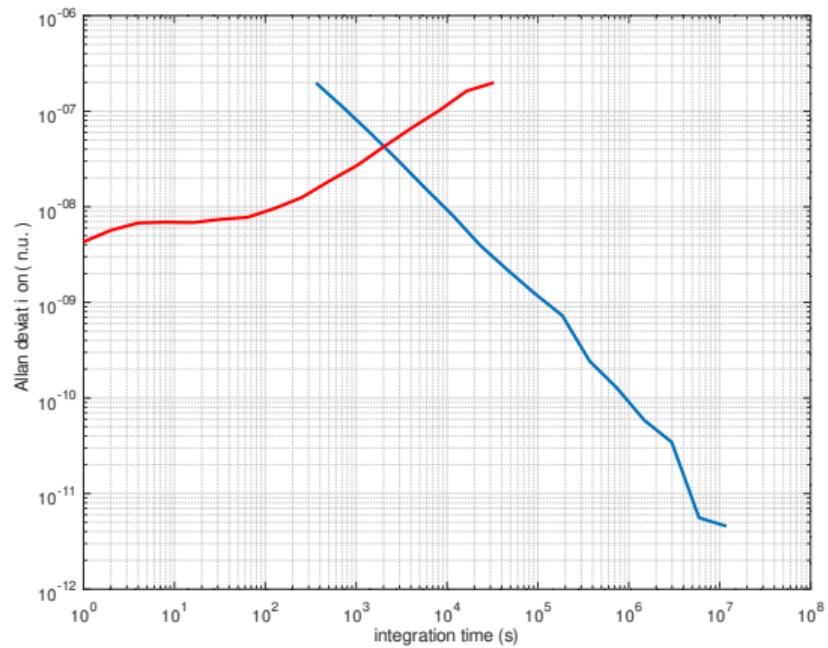


# Principe d'un oscillateur asservi

- ▶ la stabilité court terme est fournie par l'oscillateur à quartz (fort facteur de qualité pour insensibilité aux fluctuations de l'environnement)
- ▶ un principe physique stable fournit la référence à long terme
- ▶ le quartz sonde la référence pour compenser ses dérives en température, vieillissement ...



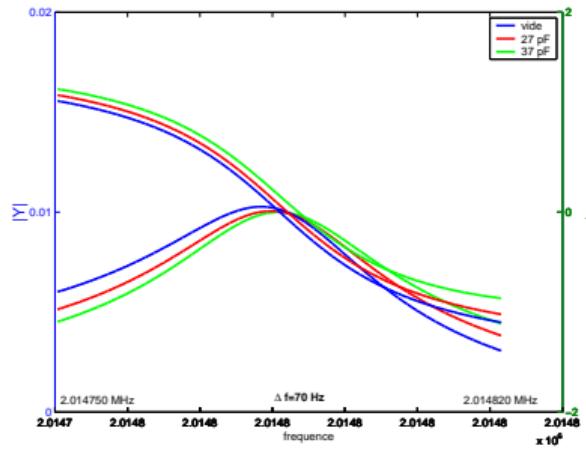
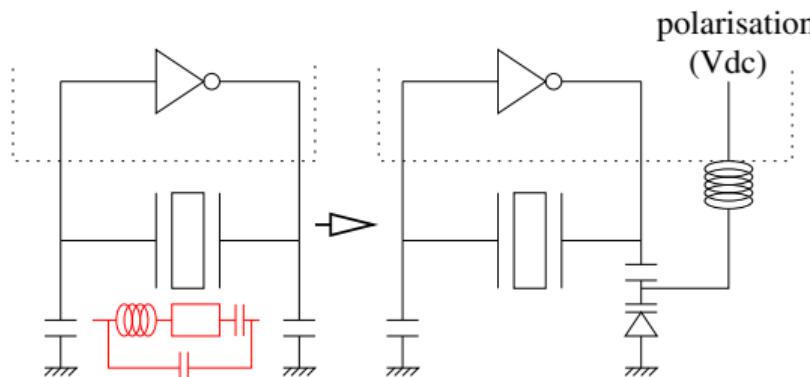
Stabilité des horloges atomiques & leur référence



Diapason à quartz v.s DCF77

## Correction d'oscillateur local

- ▶ Barkhausen<sup>6</sup> : gain compensent pertes & rotation de phase  $\propto 2\pi$
- ▶ L'ajustement de l'oscillateur local s'obtient en polarisant une varicap sur un des pieds du résonateur<sup>7</sup>
- ▶ Un compteur de fréquence mesure la fréquence de l'oscillateur (le temps de porte est considéré comme exact)
- ▶ Un asservissement compense les dérives de fréquence
- ▶ Compteur direct  $\Rightarrow$  simple à implémenter dans tout microprocesseur possédant un *timer* (Input Capture)

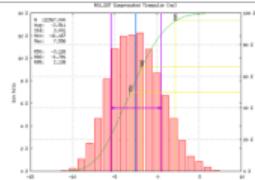


6. E. Rubiola, *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators*, Cambridge Univ. Press (2008)

7. J. Vig, *Quartz Crystal Resonators and Oscillators* (2000) à

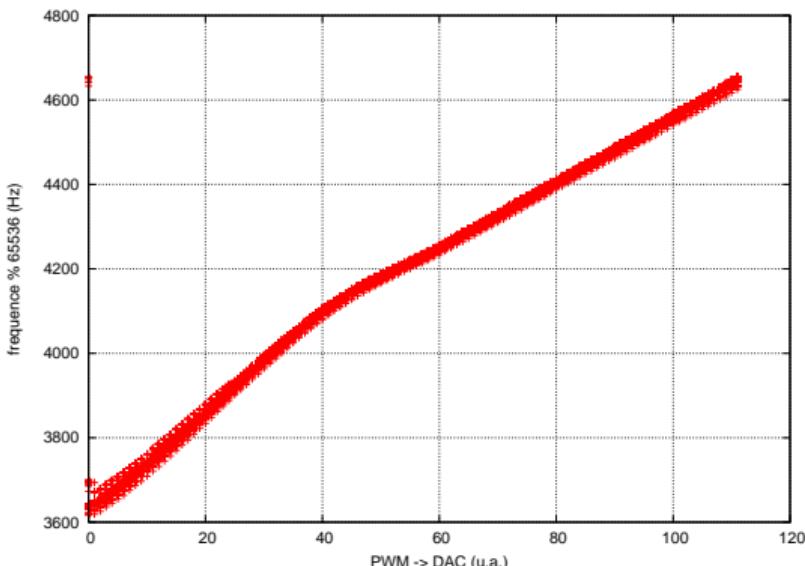
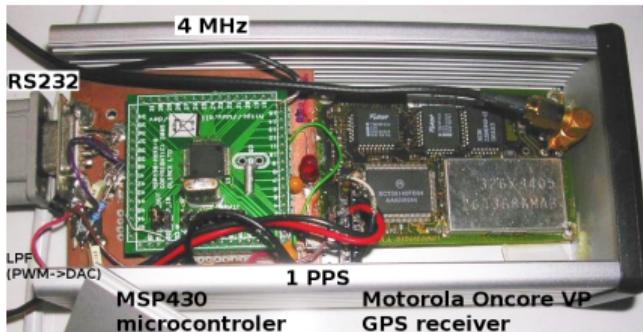
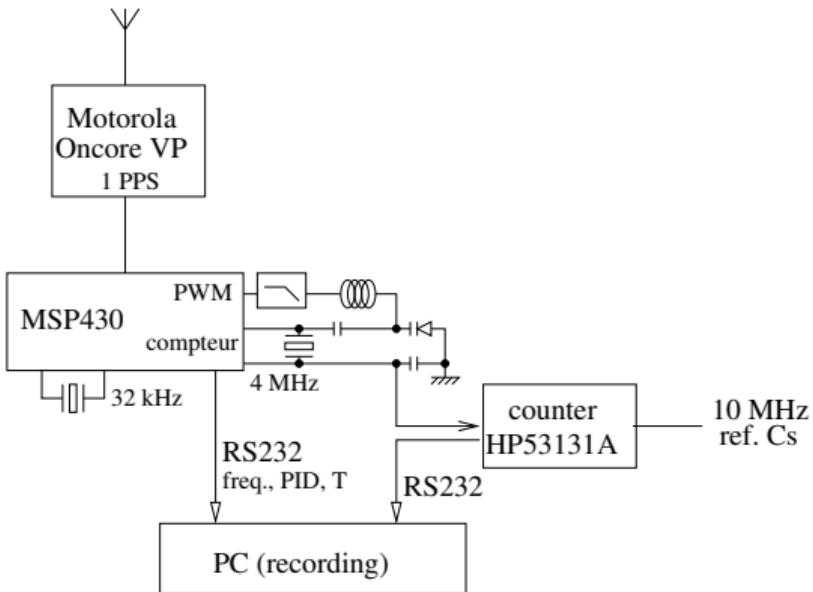
[http://www.am1.us/Local\\_Papers/U11625%20VIG-TUTORIAL.pdf](http://www.am1.us/Local_Papers/U11625%20VIG-TUTORIAL.pdf)

# Référence GPS

Standard Features	UT ONCORE™ (Precision Timing)	VP ONCORE™ (All Apps)	Motorola Oncore VP	Thales A12	Novatel Superstar2	U-Blox LEA6T																																																						
<ul style="list-style-type: none"><li>12-channel GPS receiver with up to 2 channels for SBAS</li><li>L1 frequency, C/A code (SPS)</li><li>DGPS ready (Remote)</li><li>1-Hz update rate</li><li>1 PPS (TTL)</li></ul> Precision: 250 ns (Stand-alone)	<table border="1"><tr><td>R1121A11x</td><td>&lt;50ns</td><td>X</td><td>RA/OSX</td><td>Binary</td></tr><tr><td>R1121A115x</td><td>&lt;50ns</td><td>X</td><td>ST/OSX</td><td>Binary</td></tr><tr><td>R1221A111x</td><td>&lt;50ns</td><td>X</td><td>X</td><td>RA/OSX</td><td>Binary</td></tr></table>	R1121A11x	<50ns	X	RA/OSX	Binary	R1121A115x	<50ns	X	ST/OSX	Binary	R1221A111x	<50ns	X	X	RA/OSX	Binary	<table border="1"><tr><td>B3121B111x</td><td>BIN/RTCM</td><td>X</td><td>RA/OSX</td><td>BIN/NMEA</td></tr><tr><td>B3221B111x</td><td>BIN/RTCM</td><td>X</td><td>X</td><td>RA/OSX</td><td>BIN/NMEA</td></tr><tr><td>B3121P111x</td><td>BIN/RTCM</td><td>&lt;50ns</td><td>X</td><td>RA/OSX</td><td>BIN/NMEA</td></tr><tr><td>B4121P115x</td><td>BIN/RTCM</td><td>&lt;50ns</td><td>X</td><td>ST/OSX</td><td>BIN/NMEA</td></tr><tr><td>B3121Z111x</td><td>BIN/RTCM</td><td>&lt;50ns</td><td>X</td><td>X</td><td>RA/OSX</td><td>BIN/NMEA</td></tr><tr><td>B3221Z111x</td><td>BIN/RTCM</td><td>&lt;50ns</td><td>X</td><td>X</td><td>X</td><td>RA/OSX</td><td>BIN/NMEA</td></tr></table>	B3121B111x	BIN/RTCM	X	RA/OSX	BIN/NMEA	B3221B111x	BIN/RTCM	X	X	RA/OSX	BIN/NMEA	B3121P111x	BIN/RTCM	<50ns	X	RA/OSX	BIN/NMEA	B4121P115x	BIN/RTCM	<50ns	X	ST/OSX	BIN/NMEA	B3121Z111x	BIN/RTCM	<50ns	X	X	RA/OSX	BIN/NMEA	B3221Z111x	BIN/RTCM	<50ns	X	X	X	RA/OSX	BIN/NMEA				
R1121A11x	<50ns	X	RA/OSX	Binary																																																								
R1121A115x	<50ns	X	ST/OSX	Binary																																																								
R1221A111x	<50ns	X	X	RA/OSX	Binary																																																							
B3121B111x	BIN/RTCM	X	RA/OSX	BIN/NMEA																																																								
B3221B111x	BIN/RTCM	X	X	RA/OSX	BIN/NMEA																																																							
B3121P111x	BIN/RTCM	<50ns	X	RA/OSX	BIN/NMEA																																																							
B4121P115x	BIN/RTCM	<50ns	X	ST/OSX	BIN/NMEA																																																							
B3121Z111x	BIN/RTCM	<50ns	X	X	RA/OSX	BIN/NMEA																																																						
B3221Z111x	BIN/RTCM	<50ns	X	X	X	RA/OSX	BIN/NMEA																																																					
			<ul style="list-style-type: none"><li>Operating temperature range of -30°C to +75°C</li><li>1PPS output aligned on GPS Time <math>\pm</math> 200 ns</li><li>1Hz measurement output aligned on GPS Time</li><li>Support for 62 predefined datums</li><li>Field-upgradeable firmware (stored in Flash memory) through the TTL serial port</li><li>Code and Carrier Phase tracking of L1 GPS frequency for increased accuracy</li></ul> The SUPERSTAR II also takes advantage of the corrections offered by SBAS systems such as WAAS and EGNOS for improved accuracy. For precise timing applications, the SUPERSTAR II features a 1PPS accuracy of 50 nanoseconds (typical).	 <p>Figure 9 Accuracy of time pulse with compensation.</p> <p>Note that the accuracy can also be specified in terms of an RMS value, which can also be calculated using the measured statistic. The LGA-67 Data Sheet [2] provides an RMS value of 50 ns without compensation and 15 ns with compensation.</p>																																																								

200 ns sur le signal 1 s 1PPS  $\Rightarrow$  0.2 ppm stabilité relative ( $< 0.5$  ppm) sur le long terme puisque GPS n'est pas affecté par les dérives thermiques, stress, vieillissement ...

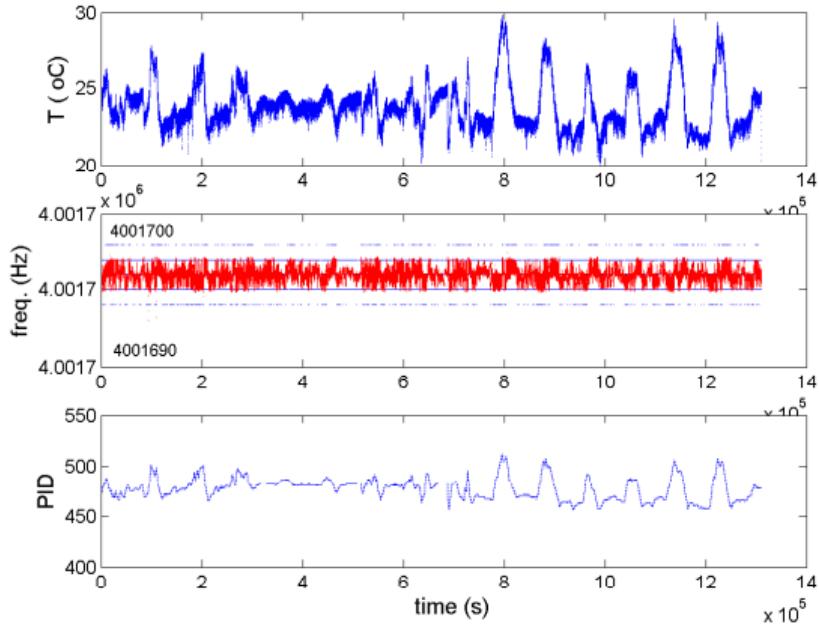
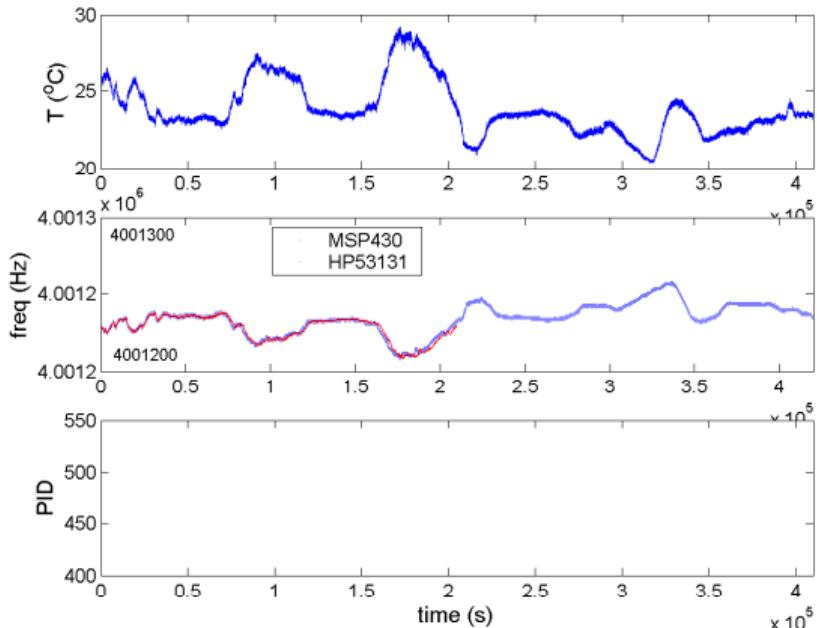
# Démonstration : boucle ouverte<sup>8</sup>



- ▶ Évolution de la fréquence en fonction de la tension de polarisation (boucle ouverte)
- ▶ ajustement sur 1 kHz autour de 4 MHz (250 ppm)

8. J.-M. Friedt & al., *Les microcontrôleurs MSP430 pour les applications faibles consommations – asservissement d'un oscillateur sur le GPS*, GNU/Linux Magazine France 98 (2007)

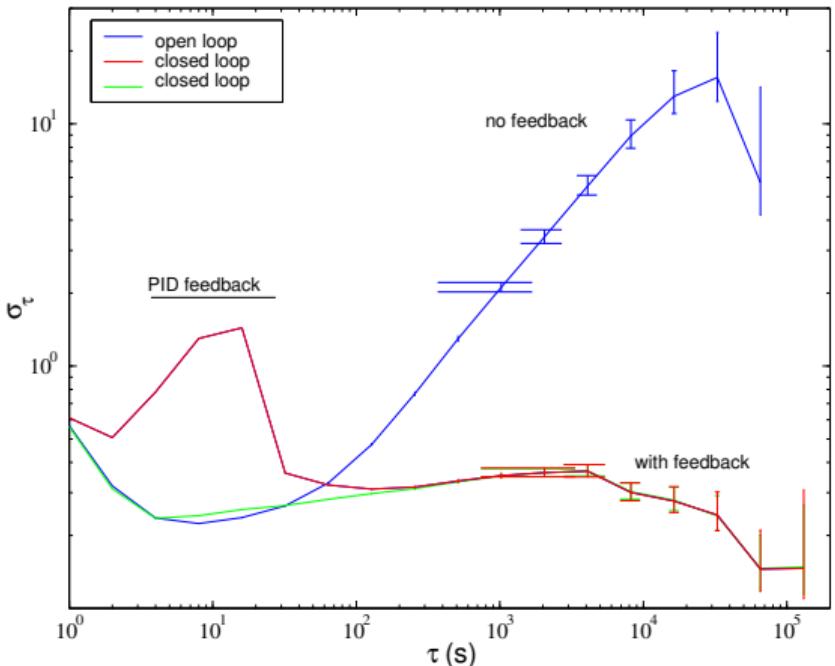
## Démonstration expérimentale : boucle fermée<sup>9</sup>



Boucle ouverte : -1 ppm/K autour de  $25^{\circ}\text{C}$ , fluc- Boucle fermée : les fluctuations de température tuations de température visibles sur le fréquence sont visibles sur la commande

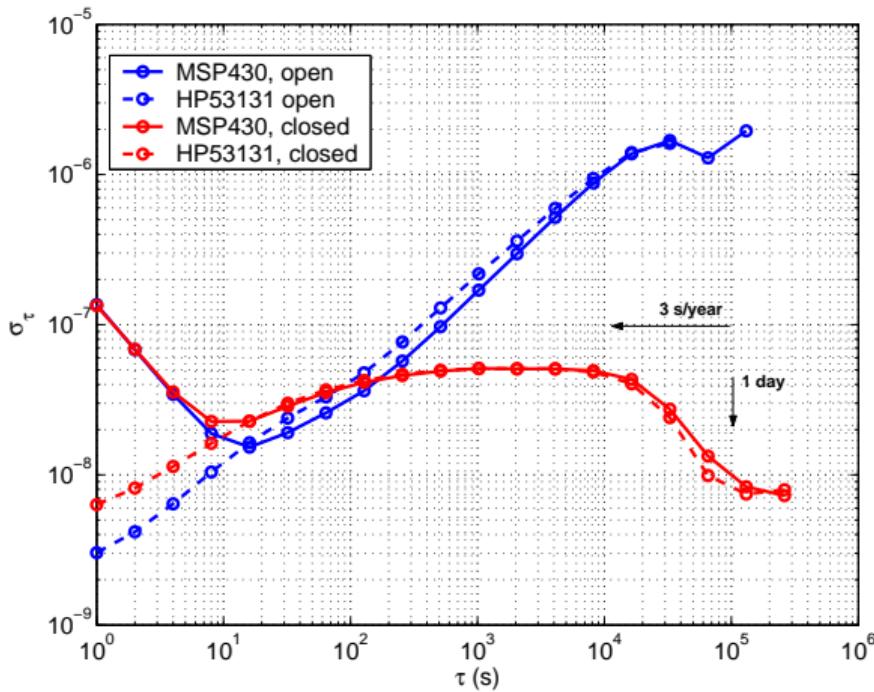
9. J.-M. Friedt & al., *Les microcontrôleurs MSP430 pour les applications faibles consommations – asservissement d'un oscillateur sur le GPS*, GNU/Linux Magazine France 98 (2007)

# Analyse des résultats



variation de fréquence absolue  $\Delta f$

- ▶  $5 \times 10^{-8} = 0,05 \text{ ppm}$  en accord avec une stabilité du 1 PPS de 50 ns
- ▶ Référence de temps accessible à *toutes les unités*, même spatialement distantes  $^{10}$



variation de fréquence relative  $\Delta f/f$

10. D. Rabus, G. Goavec-Merou, G. Cabodevila, F. Meyer, J.-M Friedt, *Generating a timing information (1-PPS) from a software defined radio decoding of GPS signals*, IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS),

# Organisation du projet

- ▶ 4 séances de préparation individuelle
  1. Présentation du projet (1,5 h)
  2. Utilisation d'un microcontrôleur (1,5 h)
  3. **Conception du circuit** et introduction au routage (KiCAD<sup>11</sup>) + conception mécanique (FreeCAD<sup>12</sup>)<sup>13</sup> – 1,5 h.
  4. **Modélisation** de la partie analogique – ngspice (1,5 h)
- ▶ Groupes de 4
  - 1. 5 séances “intensives” de câblage, programmation et mise en œuvre ( $5 \times 4$  h)
  - 2. À l'issue du projet, un membre de chaque équipe est choisi au hasard et présente le résultat de la réalisation

Homogénéiser les groupes, pas tous les membres avec la même expérience !

---

11. <https://kicad-pcb.org>

12. <https://www.freecadweb.org/>

13. J.-M Friedt, *Automatiser les tâches de conception de circuit imprimé : greffons pour KiCAD et FreeCAD*, GNU/Linux Magazine France 238 (Juin 2020)

## Questions ...

1. Identifier les broches du microcontrôleur qu'il faut absolument connecter pour le faire fonctionner, en plus des alimentations et du résonateur à quartz.
2. Quels composants additionnels, en plus du microcontrôleur, sommes nous susceptibles d'utiliser ?
3. Comment gérer la tension d'alimentation du circuit – valeur moyenne et stabilité ?
4. Comment générer la tension de commande qui ajustera le condensateur de tirage de l'oscillateur ?
5. Quels périphériques du microcontrôleur seront nécessaires aux tâches de gestion du temps qui vont nous intéresser ?

