

# Une référence atomique au césium 133 pour moins de 5 €?

ou comment recalibrer les oscillateurs de référence avec un simple module GPS



Il y a quelques mois, mon bon vieux fréquencesmètre Heathkit m'a lâché après presque 45 ans de service...

En vérifiant un transceiver VHF d'occasion, j'ai constaté qu'il affichait plusieurs kHz de décalage... étrange... mais après avoir branché mon appareil actuel, le fréquencesmètre indiquait la même valeur, toujours décalée. C'est donc le fréquencesmètre qui était en doute...

Effectivement, l'horloge à 10 MHz a sérieusement fichu le camp, ce qui fut évident après ouverture : le CV d'ajustement dans l'OCXO\* avait séché et finalement cassé... du plastique dans un four à 70 °C pendant 45 ans, on lui pardonnera...

Comment avoir accès à une référence fiable pour réétalonner ? Passer par le labo de métrologie, déposer mon appareil le matin, le brancher toute la journée pour pouvoir le vérifier avant de rentrer à la maison est une option qui n'existe plus, maintenant je ne travaille plus.

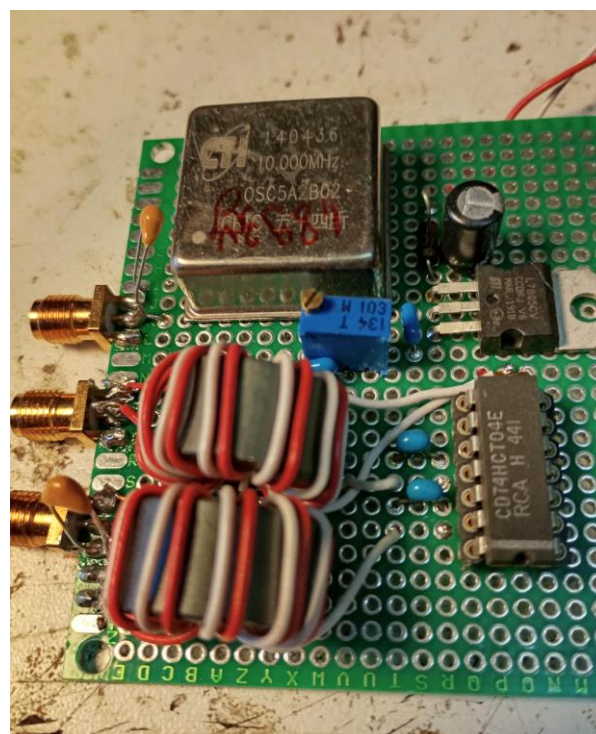
## Recherches

On trouve sur AliExpress ou eBay des OCXO 10 MHz CTI OSC5A2B02 d'occasions provenant de systèmes GSM démantelés pour 4 €.

Bon plan : j'en commande 4. Mais à nouveau, comment étalonner ce truc ? La qualité intrinsèque est bien meilleure que le vieux Heathkit, ils ont fonctionné longtemps, gage de stabilisation par vieillissement et devraient encore pouvoir le faire des années. Une entrée en tension permet l'ajustement de la fréquence.

Comme je sais que Jean-François ON4IJ est équipé d'un système GPSDO de chez Hp et d'une référence rubidium, je lui confie un petit circuit équipé d'un OCXO chinois (voir photo) en lui demandant de me le régler, afin de disposer rapidement d'une référence transportable pour pouvoir me dépanner.

Avec celle-ci, j'ai pu ajuster son jumeau placé dans le fréquencesmètre avec le scope en mode XY (lissajous).



## GPSDO

J'étais donc à nouveau opérationnel... mais pas vraiment satisfait.

J'ai alors commencé à rechercher des articles sur les GPSDO (oscillateur discipliné par GPS). Beaucoup d'articles intéressants, mais qui, après analyse, m'ont très moyennement plu : ils utilisaient des comparateurs de phase (PLL) pour commander l'ajustement de fréquence de l'OCXO en fonction du top second du GPS.

Le problème du PLL, c'est le bruit de phase.

Pour une référence que je compte aussi utiliser pour mon spectrum HP et les mélangeurs 23 et 17 cm, bof bof... à 1GHz le bruit de phase sera multiplié par 100 et par 200 à 2 GHz!

D'un autre côté un OCXO ne génère un bruit de phase qu'à cause de ses composants internes (passifs et semi-conducteurs) ce qui fait qu'il est très limité. Là, ça me plaît mieux!

Les versions chinoises de GPSDO sont toutes à ma connaissance des PLL : ça veut dire gros bruit de phase.

Il reste le FLL (frequency locked loop), mais là, mon niveau très moyen en programmation microcontrôleur va me coincer!

L'excellente description détaillée sur YouTube de Bertrand (un OM canadien : Électro Bidouilleur), d'un GPSDO qui enfin va cocher toutes les cases avec des astuces assez géniales (et arriver à une stabilité de 10-12!) m'a ravi!

Si vous désirez la référence parfaite, c'est celle-là qu'il vous faut réaliser! Je vous recommande aussi ses autres vidéos!

Comme tous les Liégeois, j'ai la tête dure! Recopier servilement une réalisation parfaite sans la modifier à ma sauce, j'ai vraiment du mal... mais modifier l'excellent GPSDO de Bertrand, c'est le dégrader! Le choix qui me reste est donc de faire la version la plus économique possible, mais qui coche mes cases à moi :

- Bruit de phase le plus bas possible
- 10 MHz, mais il existe des fréquences exotiques avec des ref à 13 MHz!!! :-o
- Pas cher!
- Facilement transportable (posé devant une fenêtre)
- Stabilité élevée à court terme
- Une rapide vérification périodique de la stabilité à long terme suffira
- Opérationnel en quelques secondes (le temps d'acquérir les satellites)
- Simple et reproductible

Comme mon but est de faire un calibrateur, c'est l'oscillateur de l'appareil à tester (dans un premier cas mon fréquencesmètre) qui sera directement comparé à la sortie du GPS. Par exemple : VCXO, TCXO, OCXO.

Comme tout OM qui bricole a au moins un petit oscilloscope et un multimètre, on se limitera à ces outils.

Mon choix s'est porté sur ce qui traînait dans mes tiroirs, un module GPS à 2,73 € (avec un ublox neo 6 m) et un interface USB ch340 (5 pièces pour 6,39 €) en option, 2 piles AA pour garder la mémoire du dernier fix et de l'almanach plus longtemps que l'accumulateur microscopique présent sur le circuit et ainsi démarrer bien plus vite tant que l'almanach est d'actualité.



La connexion série entre le ch340 et le GPS est évidente (rx sur tx, tx sur rx, 5 v et masse) un fil sur la résistance qui allume la LED récupérera le signal (pin 3 du neo6-m) qui deviendra notre référence. Si l'on désire ajouter 2 piles AA (pour plusieurs années), le + sera soudé sur la languette supérieure (+) du micro accumulateur, le – à la masse.

Le signal de la pin 3 du neo 6-m sera reprogrammé pour passer de 1 Hz à 1 kHz et mémorisé dans le module à l'aide du programme disponible sur le site ublox : <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>.

Il fait énormément de choses, mais malheureusement n'existe que sous Windows.

La gestion de l'USB-série sous Linux avec wine est parfois assez chaotique...

Dans le cas du neo 6-m ce sera u-center (pas la v2) qui gère les versions legacy (neo 6 etc.)

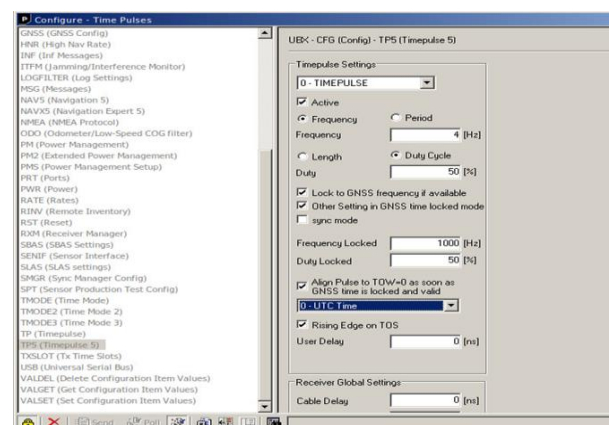
Lorsque le programme est lancé, choisir le port COM auquel le ch340 est connecté au PC (menu Receiver).

Par défaut la vitesse est de 9600 bps.



vitesse est de

Dans le menu View, choisir config view. Descendre au menu TP5 (timepulse 5). Passer de 1 Hz à 1000 Hz et duty cycle à 50 % quand le GPS est verrouillé.

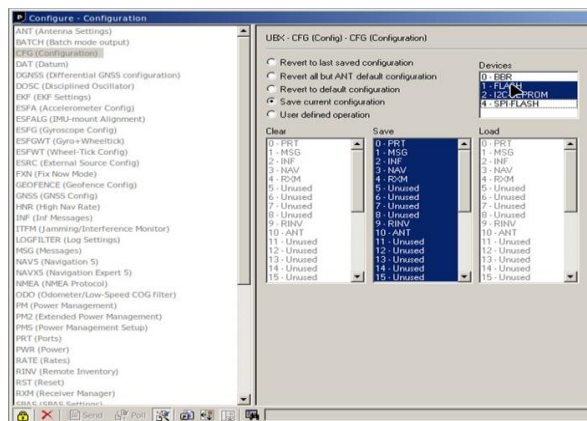


Ainsi, la LED clignotera à 4 Hz tant que le GPS n'aura pas son fix puis aura l'air allumée à moitié quand le signal 1000 Hz sera généré.

Les modules neo 7, 8, 9... plus récents permettent des fréquences de plus de 1 kHz, c'est le max pour le 6.

Libre à vous de choisir ce qui vous convient...

Ne pas oublier de sauvegarder dans la FLASH et l'EEPROM (menu CFG) :



Maintenant que le GPS est programmé, le CH340 n'a maintenant plus d'utilité, il suffira d'alimenter le GPS en 5V et de le mettre à vue des satellites.

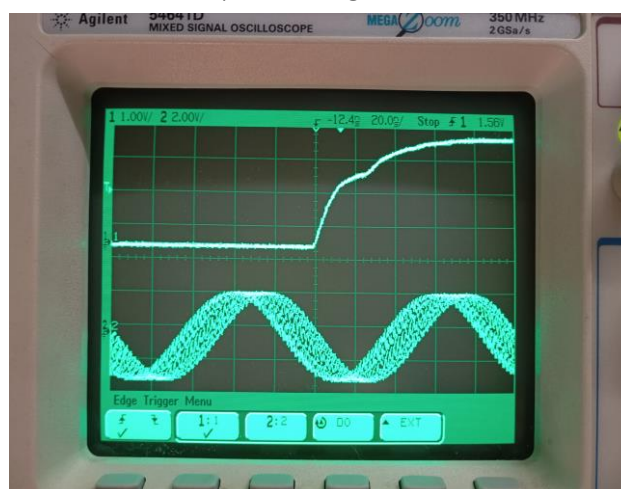
Il reste possible de lire les infos NMEA avec u-center ou un simple terminal (ou le moniteur série d'arduino IDE) en 9600 bps 8N1. Le module reste entièrement fonctionnel, et pourrait servir pour l'horloge du shack avec un Arduino qui lit le NMEA et affiche tout ce qui vous plaît sur un LCD...

Nous avons maintenant un signal de référence très précis à 1 kHz basé sur des horloges atomiques au césium : il y en a en fait 4 par satellite GPS ! Ces horloges sont surveillées de très près puisque la performance mondiale de GPS en dépend !

Ce signal, s'il a une stabilité à long terme excellente, n'est cependant pas sans défaut : un jitter de l'ordre de 15 ns est présent, ce jitter est à attribuer principalement au microcontrôleur du module ublox (service des interruptions de programme). Le bruit de phase dû à l'atmosphère et aux phénomènes relativistes liés est de plusieurs ordres de grandeur inférieurs.

Pour nettoyer ce jitter, il faudrait un traitement informatique hors de ma portée. Ce traitement est fait en interne dans le GPS, mais je n'y ai pas accès, donc j'ai choisi d'utiliser une méthode analogique moins conventionnelle...

Nous allons visualiser sur un oscilloscope les 2 signaux :



Le 1 kHz sera affiché et synchronisé sur le canal 1 de l'oscilloscope et le 10 MHz à tester sera affiché sur le canal 2.

La base de temps doit être réglée pour bien voir le 10 MHz.

Le canal 2 va donc défiler plus ou moins rapidement, selon qu'il sera éloigné de la bonne valeur à 10 MHz. On ajustera alors l'OCXO que l'on veut calibrer pour que ce défilement s'arrête : le rapport des 2 fréquences sera alors un multiple entier de 1 kHz.

Comme la plage d'ajustement d'un OCXO est étroite, il y a peu de risques d'être sur le mauvais multiple !

La procédure de vérification périodique, extrêmement rapide, se résume donc à connecter le 1 kHz du GPS au canal 1, synchro sur celui-ci, et le 10 MHz de l'horloge du fréquencemètre à l'autre entrée. Si nécessaire, retoucher le réglage de l'horloge pour annuler le défilement.

Et ce fameux jitter me direz-vous ? Il va simplement apparaître comme un épaississement du flanc montant du 10 MHz. Comme il est régulier (de l'ordre de 15 ns) on le néglige tout simplement ! Pourquoi est-ce qu'il apparaît sur le 10 MHz alors que celui-ci est en fait stable et pur ? Parce que c'est sur le canal 1 qui affiche le 1 kHz (avec son jitter) qu'on synchronise, tout simplement !

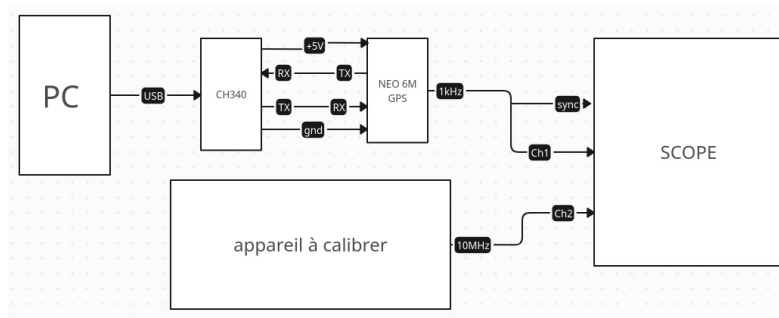
La vitesse de défilement permet de déterminer l'erreur de mesure : avec un bon OC, le glissement est si faible que l'on ne le voit presque pas à l'œil nu.

Exemple : s'il faut 10 s pour que le 10 MHz ait glissé d'une période entière par rapport à la synchro, l'erreur est de 0,1 sur 10 millions soit  $10^{-8}$ .

Un simple chronomètre permet de visualiser clairement en 100 s (ou même 50 s sur une demi-période), une erreur de  $10^{-9}$  ! A cela on ajoutera l'erreur long terme du satellite, qui est inférieure de plusieurs ordres de grandeur. Notez l'erreur avant chaque vérification pour le futur...

La procédure s'adapte facilement pour vérifier et ajuster par comparaison tout oscillateur dont la fréquence est un multiple entier de 1 kHz, ou en choisissant une autre valeur dans la programmation du module ublox des multiples entiers de ce que vous voudrez.

Schéma bloc :



JF Mussen (ON1KFK)

\* Différents types d'oscillateurs à quartz suivant Wikipedia

- **ATCXO** : *Analogue Temperature-compensated Crystal Oscillator*
- **CDXO** : *Calibrated Dual Crystal Oscillator*
- **MCXO** : *Microcomputer-compensated Crystal Oscillator*
- **OCVCXO** : *Oven-Controlled Voltage-Controlled Crystal Oscillator*
- **OCXO** : *Oven-Controlled Crystal Oscillator*

- **RbXO** : Rubidium Crystal Oscillator, un quartz qui peut être de la famille MCXO, synchronisé par une horloge au rubidium, et activée occasionnellement pour économiser l'énergie.
- **TCVCXO** : Temperature-Compensated Voltage-Controlled Crystal Oscillator
- **TCXO** : Temperature-Compensated Crystal Oscillator
- **TSXO** : Temperature-Sensing Crystal Oscillator, une variante du TCXO
- **VCXO** : Voltage-Controlled Crystal Oscillator
- **DTCXO** : Digital Temperature Compensated Crystal Oscillator, le même principe que le MCXO
- **GPS** : GPS Disciplined Oscillator oscillateur discipliné par GPS

## Liens :

- Electro bidouilleur GPSDO : [\(24\) EB #518 Projet - Référence 10 MHz asservie au GPS, Partie 1 - Présentation - YouTube](#)
- Datasheet GPS : [https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6\\_DataSheet\\_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf)  
Les modèles plus récents (neo 7,8,9...) permettent de générer jusqu'à 100 kHz, la manip est la même
- Programme U-center : <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>
- OCXO de remplacement dans le fréquencesmètre : <https://dl6gl.de/media/files/ocxo-cti-osc5a2b02-datasheet.pdf>

Il y a certainement d'autres usages auxquels je n'ai pas pensé... Envoyez donc vos idées originales !