

# Asservissement d'un oscillateur quartz sur base d'un signal GPS

Ing. A.PALMAERS  
Ir R.NIZET  
Ir N.GILLIEAUX-VETCOUR  
GRAMME – Liège

*Afin d'éviter la perte ou la corruption de données dans les réseaux de télécommunication, il est nécessaire de cadencer le rythme de travail des équipements de transfert de données à l'aide d'unités de synchronisation. Cet article présente l'étude et la réalisation d'un module de synchronisation sur base d'un oscillateur quartz. Ce module délivre une horloge de référence (2048 kHz) calibrée sur un signal GPS afin d'atteindre des performances de stabilité de l'ordre de  $10^{-10}$  par jour.*

*Mots-clefs : synchronisation, oscillateurs contrôlés en tension, GPS, pulse par seconde, asservissement, boucle à verrouillage de phase, gigue.*

*In order to prevent the loss or the corruption of data in telecommunication networks, transmission rates of the network equipments are locked to a common frequency source (called synchronisation unit). This paper presents the study and realization of a synchronisation unit using a quartz crystal. This unit provides a reference clock (2048 kHz) locked on a GPS signal in order to reach a stability performance reaching  $10^{-10}$  per day.*

*Keywords : synchronisation, voltage controlled crystal oscillators (VCXO), GPS, pulse per second, control systems, phase locked loop (PLL), jitter.*

## 1. Introduction à la synchronisation

Pertes de données, fax illisibles, images vidéo figées et messages cryptés indéchiffrables sont les conséquences d'une mauvaise synchronisation. Ces problèmes nécessitent bien souvent une retransmission des données, ce qui rend le transfert de données beaucoup plus lent et entraîne une surcharge du réseau.

Imaginons deux équipements terminaux (fig.1). Le terminal 1 envoie des informations vers le terminal 2. Vu la longueur du trajet de transmission, des nœuds intermédiaires sont nécessaires à l'acheminement de cette information.

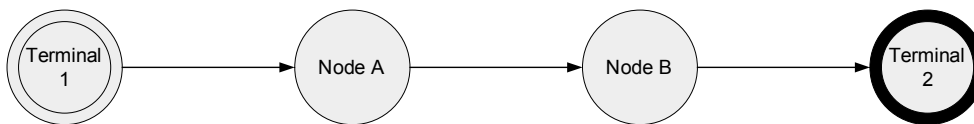


Figure 1 : Communication entre nœuds et équipements terminaux

Lors de la transmission, une source (terminal, nœud) envoie une série de données vers un récepteur (nœud, terminal). L'horloge située à la source contrôle la vitesse (la fréquence) et l'instant (la phase) de la donnée transmise. Une seconde horloge (récepteur) contrôle la vitesse de lecture. Un asynchronisme entre les horloges source et réceptrice est responsable d'une perte éventuelle de données (phénomène de dérapage) ( fig. 2).

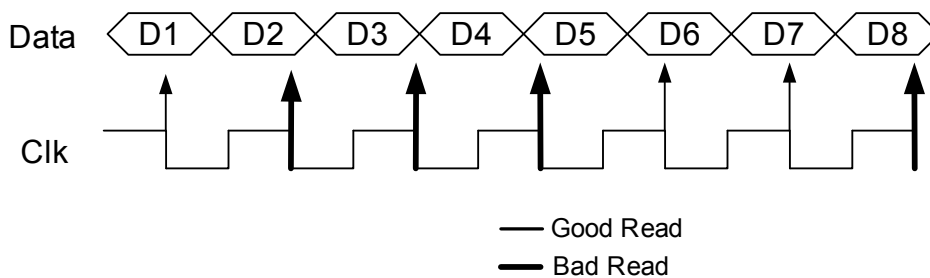


Figure 2 : Phénomène de dérapage (slip)

On définit ainsi la synchronisation comme étant « le moyen mis en œuvre pour garder tous les équipements numériques d'un réseau de télécommunication à un même rythme de travail. »

Une mauvaise synchronisation est due soit à une différence de fréquence entre les deux horloges nodales, soit à un mouvement de phase appelé ‘jitter’ ou ‘wander’. Ces mouvements de phase, causés par les médiums de transmissions et les équipements, déforment l’horloge de référence transmise par le réseau.

A l’heure actuelle, la tendance est d’adjoindre au réseau de transfert de données, un second réseau : le réseau de synchronisation (fig. 3).

Ce réseau de synchronisation est basé sur une structure hiérarchique : une horloge de précision supérieure (niveau supérieur) fournit un signal de référence aux horloges de niveau inférieur (Unités de synchronisation – Synchronisation Supply Units : SSU).

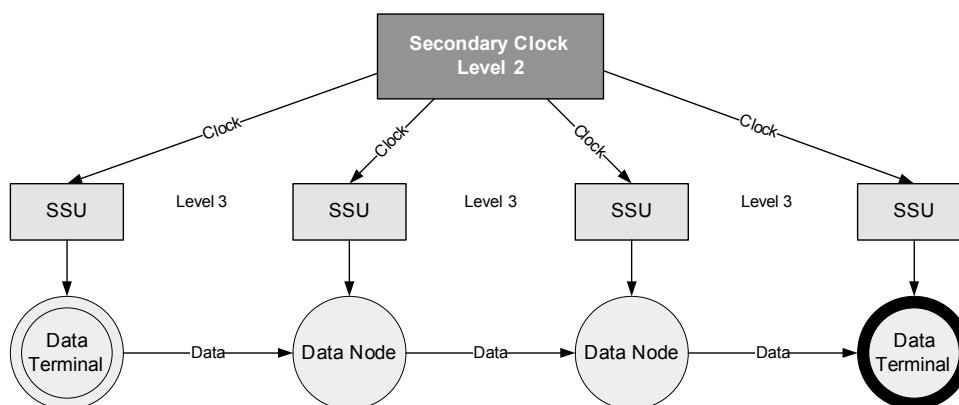


Figure 3 : Principe de la distribution hiérarchique

Ce réseau a pour but de fournir une horloge de référence aux différents équipements de transfert de données afin de leur assurer un même rythme de travail et minimiser ainsi les pertes ou la corruption de données.

## 2. Les oscillateurs

Un oscillateur génère idéalement un signal de fréquence  $f_0$ . Cette fréquence idéale est caractérisée par une raie dans le spectre fréquentiel.

Malheureusement, le signal issu de l’oscillateur voit sa fréquence instantanée dériver avec le temps, la température, etc. (fig. 4). Ces dérives se tra-

duisent par des mouvements de phase (court terme) et une dérive fréquentielle (long terme).

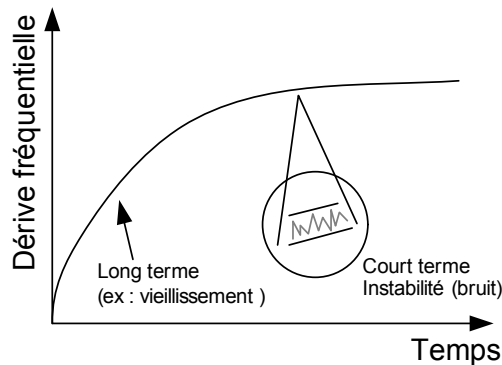


Figure 4 : Dérive fréquentielle vs. Instabilités à court terme

En termes temporels, le phénomène de mouvement de phase se caractérise par une instabilité dans la période du signal (gigue de phase<sup>1</sup>) (fig. 5). En termes fréquentiels, il se caractérise par un étalement du spectre du signal (bruit de phase) (fig. 6).

Ce signal bruité suit une distribution statistique normale (gaussienne). Cela signifie que sur une période infinie de mesure (sous l'hypothèse d'une dérive fréquentielle nulle), sa moyenne tend à suivre la valeur moyenne du signal idéal (intégration du bruit de phase – moyennage).

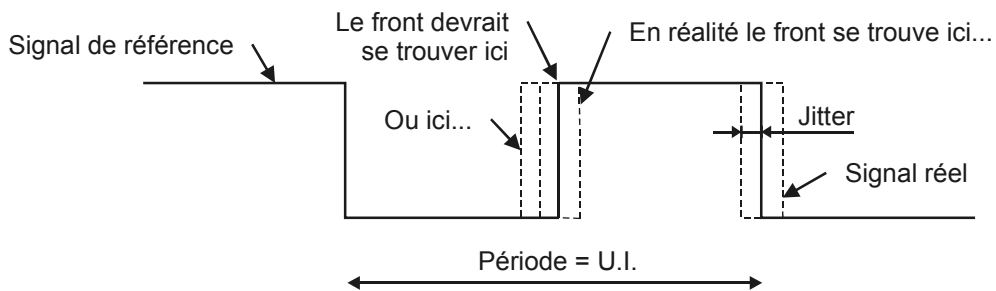


Figure 5 : Visualisation temporelle - Gigue de phase (jitter)

<sup>1</sup> La gigue de phase correspond à une modulation de la phase du signal. Cette modulation agit à basse fréquence (wander – long terme) ou à haute fréquence (jitter – court terme).

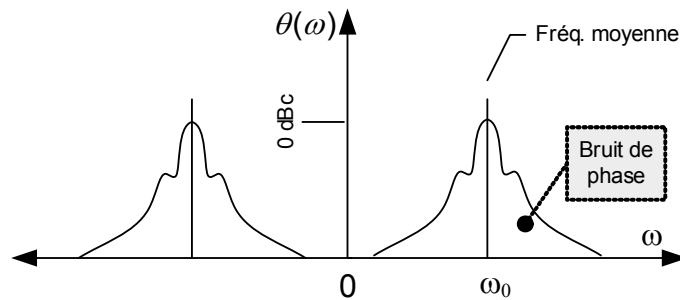


Figure 6 : Spectre fréquentiel - Bruit de phase

### 3. Calibration sur un signal GPS 1 pulse par seconde (PPS)

Sachant que l'on désire réaliser un système qui délivre un signal d'horloge présentant une stabilité de l'ordre de  $10^{-10}$  par jour, il est impératif de déterminer une solution capable d'atteindre ces exigences de performance.

La réalisation d'une unité de synchronisation basée uniquement sur un cristal quartz n'est pas envisageable vu les pauvres performances à long terme d'un tel cristal. A l'inverse, une unité basée sur un rubidium ou un césium est extrêmement stable mais pour un coût relativement élevé.

Nous pouvons voir sur la figure 7 qu'il existe une solution intermédiaire satisfaisant aux exigences de performances souhaitées.

L'utilisation conjointe d'un oscillateur quartz (Oven Controlled Crystal Oscillator – OCXO) ayant des caractéristiques excellentes à court terme et d'un signal GPS ayant des caractéristiques excellentes à long terme, permet de réaliser un système relativement bon marché, autonome, précis, stable et fiable<sup>2</sup>.

Le signal GPS émis par les satellites est généré à partir d'oscillateurs haute précision (césium, rubidium). C'est pourquoi, le signal PPS (1 pulse par seconde) généré par les récepteurs GPS possède une stabilité de l'ordre de  $10^{-12}$  par jour. Sa période moyenne étant de 1 s, son écart-type (sigma) est de 150 ns (fig. 8).

<sup>2</sup> La constellation GPS est gérée intégralement par le DoD. of US. Sa fiabilité dépasse les 500.000 heures de fonctionnement. Cependant, celle-ci étant gérée par le département de défense (DoD), il va de soi que la fiabilité du système est réduite à néant en cas de guerre.

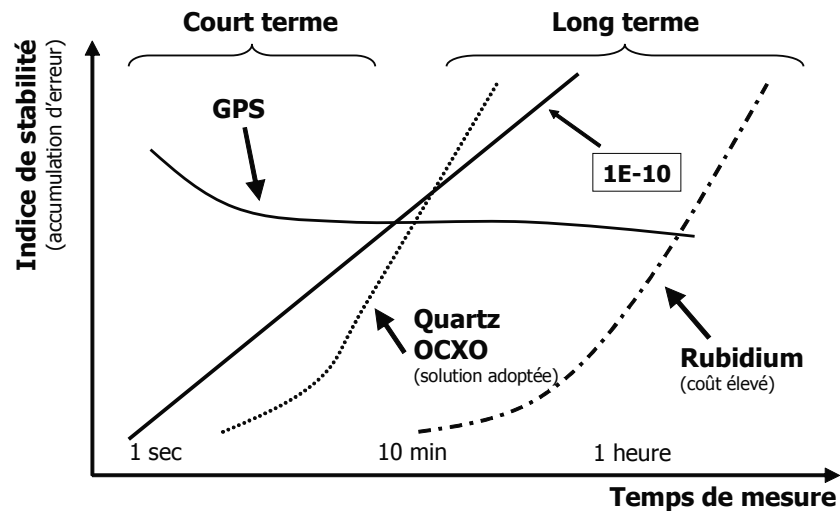


Figure 7 : Courbes de performances de différents systèmes de référence

Ce signal PPS peut être utilisé pour calibrer un signal de fréquence supérieure, dont la stabilité à long terme est pauvre, mais qui atteint de bonnes performances à court terme (généralement un oscillateur quartz contrôlé en tension - VCO).

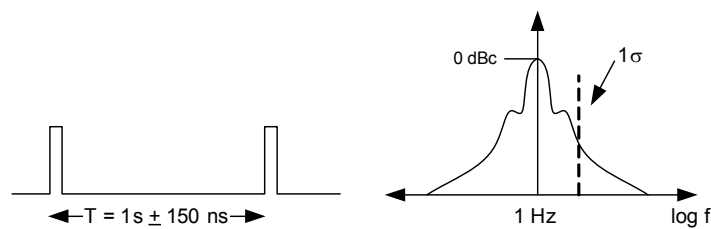


Figure 8 : Caractéristiques temporelles du signal 1 PPS

Afin de réaliser la calibration du signal, un système doit pouvoir filtrer les mouvements de phase à hautes fréquences (jitter). La boucle à verrouillage de phase (PLL) permet cette calibration en réalisant un filtrage passe-bas de la phase du signal de référence (fig. 9).

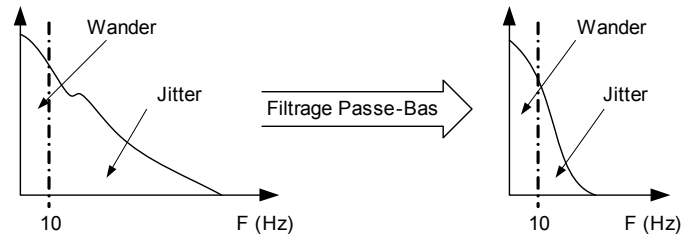


Figure 9 : Filtrage passe-bas (PLL)

#### 4. Les boucles à verrouillage de phase (PLL)

Le but d'une boucle à verrouillage de phase est d'asservir la phase d'un oscillateur interne sur un signal de référence. Le système doit donc s'arranger de manière telle que l'oscillateur produise un signal en cohérence de phase (fig. 10).

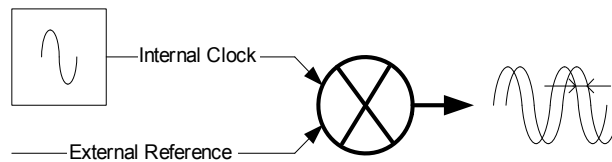


Figure 10 : Production d'un signal en cohérence de phase

Une boucle à verrouillage de phase (fig. 11) est constituée d'un comparateur de phase, d'un filtre passe-bas et d'un oscillateur à fréquence ajustable (VCO).

La sortie du comparateur quantifie l'erreur de phase entre le signal de l'oscillateur interne et celui de la référence (généralement sous forme d'une tension). La sortie est traitée par le filtre dont le résultat est fourni à l'oscillateur.

Une variation de l'un des signaux (référence ou signal interne) entraîne une variation du déphasage et, par conséquent, une variation de l'erreur de phase. Le système bouclé va s'opposer à cette variation afin de stabiliser l'ensemble du système.

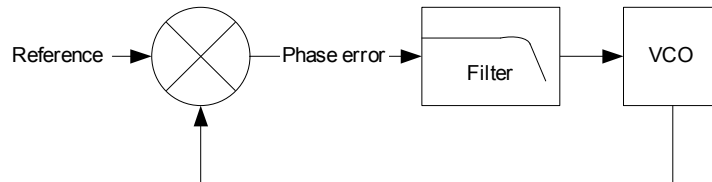


Figure 11 : Principe de la boucle à verrouillage de phase

Le filtre passe-bas est l'élément essentiel de la boucle. Il corrige le signal d'erreur (erreur de phase) et atténue les bruits indésirables (bruit de phase, etc.).

Le système modélisé dans le cadre de ce travail est un système de second ordre dont le filtre possède un intégrateur parfait<sup>3</sup>. L'oscillateur pouvant être modélisé comme un intégrateur également, ce système est très lent par nature. Ce système se fige (se verrouille) sur la valeur moyenne (phénomène d'intégration) du signal de référence (cf. paragraphe 2.).

## 5. Analyse de l'asservissement

La boucle à verrouillage de phase est soumise à divers bruits : instabilité de la référence et instabilité de l'oscillateur pour les principaux.

Afin d'assurer un système stable, il est nécessaire de réaliser un filtrage passe-bas pour atténuer le bruit de la référence (atténuation du bruit de phase de la référence en dehors de la bande passante) ( $S_{\theta,ref}(j\omega)$  : fig. 12). Il faut donc réduire la bande passante<sup>4</sup> du système.

Cependant, une bande passante trop petite augmente le bruit de phase introduit par le VCO (atténuation du bruit de phase du VCO dans la bande passante. En dehors de cette bande passante, le bruit du VCO apparaît intégralement ( $S_{\theta,VCO}(j\omega)$  : fig. 12). De même, une réduction de la bande passante

<sup>3</sup> Le système a été conçu de manière à être insensible aux modulations de la phase de référence. Le but de l'application est de fournir une référence stable. D'autres conceptions de PLL (pour d'autres applications) sont conçues de manière telle que la boucle suive fidèlement les modulations de la phase de référence (Démodulateur FM, etc.)

<sup>4</sup> Un système dont la bande passante est étroite est un système lent.



augmente le temps d'établissement du système (augmentation de la constante de temps du filtre).

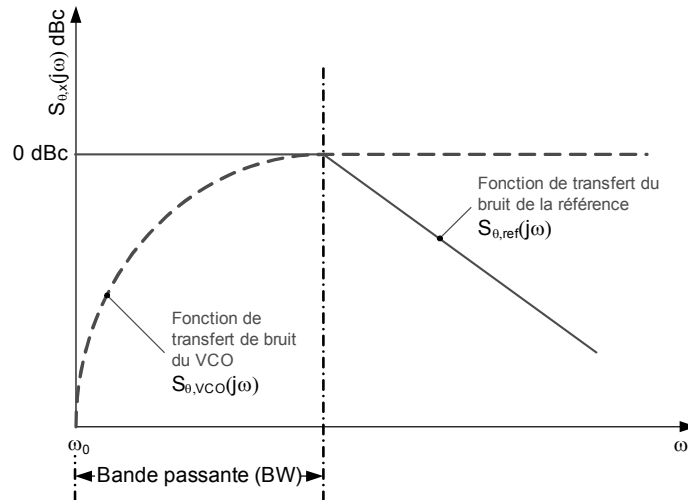


Figure 12 : Sensibilités<sup>5</sup> du système PLL

La constante de temps du filtre d'un tel système est de l'ordre de 100 à 500s. Il est donc inconcevable de réaliser le filtre passe-bas à l'aide de techniques analogiques simples (génération intense de bruit blanc alors que l'on souhaite minimiser le bruit). Un filtre numérique a donc été réalisé. Il a été modélisé de manière à présenter une réponse équivalente au filtre analogique.

L'analyse a montré également que le choix d'un oscillateur OCXO (oscillateur quartz contrôlé en tension et régulé en température dans une enceinte fermée) était plus judicieux que celui d'un simple VCXO (oscillateur quartz contrôlé en tension non compensé).

Les avantages de l'OCXO sont : une fréquence basse (car le bruit de la référence est multiplié par la fréquence de l'oscillateur), un faible bruit de phase

<sup>5</sup> Le diagramme de Bode ici présenté exprime une modulation de phase à la fréquence  $\omega - \omega_0$ ,  $\omega_0$  étant la pulsation centrale (idéale) de l'oscillateur asservi. Remarquons également que l'unité dBc correspond à un gain exprimé en dB pour lequel on pose 0 dBc comme étant le gain de la porteuse (dB relative to the carrier).

et une excellente linéarité afin de satisfaire les hypothèses des systèmes linéaires.

Le comparateur de phase est réalisé à l'aide d'un compteur numérique de fronts d'horloge<sup>6</sup>. Ensuite, un module analogique et une étude d'échantillonnage statistique permettent d'améliorer la précision de mesure et, par conséquent, la précision de contrôle de l'oscillateur.

## 6. Références bibliographiques

- [1] BANERJEE D., *National Semiconductor, PLL Performance, simulation and design*, 1998.
- [2] BROW T.S., Gilson M.J., Mason M.G., *Synchronisation in data networks*, BT Technologies J., Vol. 16, January, 1998.
- [3] CHANDLER D., *Corning Frequency Control, Application Note, Phase Jitter, phase noise and Voltage Controlled Crystal Oscillators*.
- [4] CLERC P., Masson, TUI, *Automatique continue et échantillonnée*, Paris, 1996.
- [5] DERIJCK D., *Traitement numérique du signal* (notes de cours), Institut Gramme Liège.
- [6] FRUEHAUF H., FEI-Zyfer Inc., *Understanding Time and Frequency Specs*, January, 2004.
- [7] GILLIEAUX-VETCOUR N., *Automatique : régulation* (notes de cours), Institut Gramme Liège, 2003.
- [8] HEWLETT PACKARD, *GPS and Precision Timing Applications*, Application Note 1272, May, 1996.
- [9] ITU-T, *ITU-T Recommendations G.812 – G.811 – G.810 – G.703*, International Telecommunication Union.
- [10] KUO B.C., *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall International Editions, Fifth Edition, 1987.
- [11] MF Electronics, *Understanding VCXOs to avoid Overspecifying them*
- [12] Mini-Circuits, *VCO Designer's Handbook*, 2001.
- [14] STENSBY J.L., *Phase Locked Loops – Theory and Applications*, CRC Press, 1997.
- [15] Vectron, Application Notes.

---

<sup>6</sup> La précision du compteur est inversement proportionnelle à la fréquence de l'oscillateur. La fréquence de l'oscillateur a été choisie à 4096 kHz afin de satisfaire le cahier des charges, minimiser l'influence du bruit de la référence et atteindre une précision raisonnable au comparateur.

- [16] VIG J.R., *Quartz Crystal Resonators And Oscillators*, U.S., Army Communications-Electronics Command, January, 2001.
- [17] WACKER M.F., *Frequency Stability Characterization In The Time Domain*, Corning Frequency Control.