

# Introduction à l'étude de la boucle à verrouillage de phase

7 août 2022

La « boucle à verrouillage de phase » est un montage d'électronique relativement facile à mettre en œuvre, avec du matériel disponible dans la plupart des salles de TP d'électronique. Elle rentre dans la catégorie des systèmes bouclés, comme son nom l'indique. Ce document vous propose quelques pistes pour comprendre son fonctionnement.

Point important de terminologie avant de commencer : il ne faut pas confondre « phase » et « phase à l'origine » ! Dans le cas qui nous intéresse, la phase d'un signal  $s(t)$  tel que  $s(t) = A \sin(\omega t + \varphi(t))$ , est  $(\omega t + \varphi(t))$  (l'argument du sinus). La pulsation est  $(\omega + \frac{d\varphi(t)}{dt})$  : il s'agit de la dérivée temporelle de la phase. La phase à l'origine est la valeur de la phase à  $t = 0$ , dans ce cas c'est  $\varphi(0)$ .

## 1 Expérience introductive et problématique

Pour commencer, prenez deux GBF numériques, un oscilloscope à deux entrées minimum, et 2 câbles coaxiaux. Branchez chaque GBF sur une entrée différente de l'oscilloscope.

Réglez les GBF de manière à ce qu'ils délivrent un signal sinusoïdal de fréquence élevée (1 MHz par exemple), en choisissant exactement la même fréquence pour les deux GBF. Visualisez les deux signaux sur deux voies de l'oscilloscope.

Faites en sorte de stabiliser le signal sur l'une des voies avec le déclenchement. Réglez la base de temps de manière à bien voir les oscillations du sinus.

On constate que le second signal n'est pas stabilisé en même-temps que le premier. Il n'est pas possible de stabiliser les deux signaux simultanément. On en déduit que les deux signaux, en dépit de ce qui peut être indiqué sur les cadrans des GBF, ne sont pas à la même fréquence !

Faites varier la fréquence du GBF non stabilisé, de manière à ce qu'il soit le plus stable possible vis-à-vis de l'autre signal. On constate une différence de quelques Hz entre les fréquences indiquées par les deux GBF. Ceci permet de mettre en lumière certaines limitations des GBF.

Il arrive que, dans certaines situations, on ait besoin de synchroniser les comportements de deux circuits électriques (en microélectronique notamment). Mais ici, **le réglage en fréquence des GBF n'est pas assez précis pour qu'il soit aisé de synchroniser leurs deux signaux simplement**. Les GBF reposent en général sur des oscillateurs à quartz et d'autres composants, qui peuvent présenter des variations de comportement selon certains paramètres physiques, comme la température. **On peut chercher donc un moyen de synchroniser les deux signaux délivrés par les deux GBF**. C'est précisément à cette problématique que la boucle à verrouillage de phase permet de répondre.

## 2 La modulation en fréquence

Nous allons utiliser les fonctions de modulation en fréquence des GBF pour synchroniser les deux signaux.

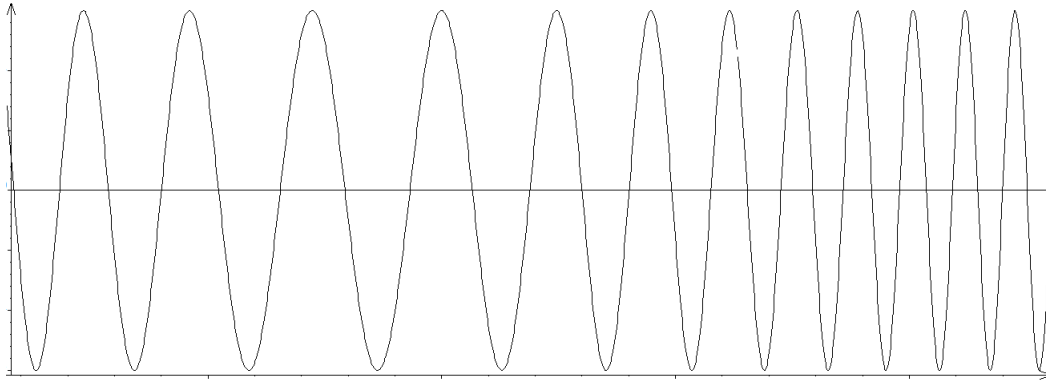


FIGURE 1 – Un signal sinusoïdal dont la fréquence augmente au cours du temps.

Les GBF numériques sont, en général, dotés d'une entrée Modulation (à l'arrière de l'appareil sur les Agilent) sur laquelle on peut brancher un câble coaxial. Il peut également y avoir une indication de tension, par exemple  $\pm 5V$ . Référez-vous à la notice de vos GBF au cas-où.

Les GBF peuvent délivrer un signal modulé en fréquence. Par exemple, un signal sinusoïdal modulé en fréquence serait représenté par une équation du style  $s(t) = A \sin(2\pi f(t) \times t)$  où  $f(t)$ , au lieu d'être une constante, serait une fonction du temps.

L'entrée Modulation du GBF permet d'injecter un *signal modulant*, qui conditionnera les variations de la fréquence du signal modulé. Par exemple, mettons que l'on ait un GBF délivrant un signal sinusoïdal de 10Hz. On peut régler ce GBF de manière à ce qu'il fasse varier sa fréquence de 2Hz si il reçoit une tension de +5V dans son entrée modulation.

Si on branche une alimentation délivrant une tension constante de +5V sur cette entrée, le signal du GBF aura alors une fréquence de 12Hz au lieu de 10Hz. On peut également parier que, si la tension de l'alimentation stabilisée est de -5V, la fréquence du GBF sera de 8Hz.

Si on branche une alimentation délivrant un signal sinusoïdal égal à  $5 \sin(2\pi \times 1 \times t)$  volts sur cette entrée, alors la fréquence du signal modulé variera sinusoïdalement, à une fréquence de 1Hz, entre 8Hz et 12Hz.

L'astuce sur laquelle repose la boucle à verrouillage de phase est la suivante : Prenons deux oscillateurs (deux GBF). L'un servira de référence, et délivrera un signal de fréquence constante. On souhaite synchroniser le second oscillateur sur le premier, c'est-à-dire lui faire délivrer un signal de même fréquence que la référence. Il dispose, heureusement, d'une entrée modulation. En général, comme vu lors de l'expérience introductive, on ne pourra pas faire cela simplement en réglant les deux GBF de la même façon. Cependant, il peut exister une valeur de tension précise à mettre sur l'entrée modulation du second GBF, pour laquelle son signal de sortie a exactement la même fréquence que le signal de référence !

Le but de la boucle à verrouillage de phase est de « trouver » cette valeur et de la maintenir pour synchroniser les deux signaux.

## 3 Réalisation pratique

### 3.1 Montage

Matériel requis :

- 2 GBF (dont au moins 1 modulable en fréquence)
- Câbles coaxiaux.
- Câbles BNC-banane.
- Connecteurs en T.

- Oscilloscope à deux voies minimum.
- Boîte à décades de résistances.
- Boîte à décades de condensateurs.
- Multiplieur.

Réalisez le montage suivant :

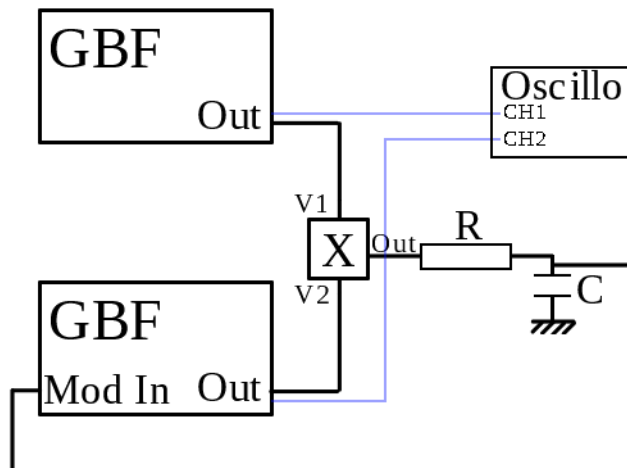


FIGURE 2 – Branchements pour la boucle à verrouillage de phase

Un GBF (celui du haut sur le schéma) servira de référence : réglez-le pour qu'il envoie un signal sinusoïdal  $s_1(t)$  de fréquence 1kHz environ pour commencer.

Le second GBF envoie un signal sinusoïdal modulé en fréquence  $s_2(t)$ . Réglez-le pour qu'il envoie un signal de fréquence proche, mais non identique, à celle de la référence.

Au moyen des connecteurs en T, faites en sorte de visualiser simultanément sur l'oscilloscope les signaux en sortie des deux GBF.

Les signaux de sortie passent par un multiplieur. La sortie de ce multiplieur est ensuite filtrée par un circuit RC (passe-bas). La tension de sortie du filtre, aux bornes du condensateur, est ensuite injectée dans l'entrée de modulation du GBF à synchroniser.

### 3.2 Fonctionnement de base

Mettons en équations :

Le signal de référence s'écrit  $s_1(t) = A \cos(\omega_1 t)$ .

Le signal à synchroniser s'écrit  $s_2(t) = B \cos(\omega_2 t + \varphi_0)$ .  $\omega_2$  et  $\varphi_0$  seront amenées à varier au cours de l'expérience.

En sortie du multiplieur, on obtient une tension  $s_m(t)$  égale à :

$$s_m(t) = g_m \times A \times B \times \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t + \varphi_0)$$

avec  $g_m$  le gain du multiplieur. Souvent il est égal à 1/10.

En utilisant d'astuces trigonométriques, on réécrit cette expression comme une somme de cosinus :

$$s_m(t) = ABg_m \times \frac{1}{2} (\cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_0) + \cos((\omega_1 - \omega_2)t - \varphi_0))$$

Si les deux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont proches,  $s_m(t)$  est clairement la somme d'un signal de haute fréquence ( $\omega_1 + \omega_2$ , de l'ordre du kilohertz) et d'un signal de basse fréquence ( $\omega_1 - \omega_2$ , de l'ordre de la dizaine de hertz ou du hertz par exemple).

Le filtre passe-bas permet, s'il est dimensionné correctement, de ne conserver que la composante basse fréquence du signal. En sortie du filtre, on trouve donc un signal de la forme :

$$s_f = A \times B \times g_m \times g_f \times \frac{1}{2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t - \varphi_0)$$

avec  $g_f$  le gain du filtre.

Le signal  $s_f$  repart dans l'entrée modulation du GBF à synchroniser.

Et ensuite ?

On peut imaginer deux situations pour la boucle :

- $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont différents. Dans ce cas, la sortie du filtre est un signal oscillant : par conséquent  $\omega_2$  varie en permanence.
- $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont identiques : dans ce cas, la sortie du signal ne varie plus dans le temps (l'argument du cosinus est  $\varphi_0$ ).

Ainsi, la tension de sortie du filtre va varier, donc la fréquence du second GBF également, et ceci jusqu'à ce qu'elle soit identique à celle du GBF de référence : à ce moment la tension de sortie du filtre se stabilise, comme la fréquence, et la boucle est « verrouillée. »

Dans le deuxième cas, la tension en sortie du filtre devient constante et vaut :

$$s_f = A \times B \times g_m \times g_f \times \frac{1}{2} \times \cos(\varphi_0)$$

Une fois les branchements faits et les appareils allumés et configurés, stabilisez le signal de référence sur l'oscilloscope. Le signal à synchroniser n'est normalement pas encore stable. Puis activez et désactivez la modulation en fréquence sur le GBF modulé. Lorsque la modulation est activée, vous devriez pouvoir observer le signal à synchroniser se stabiliser rapidement sur l'écran : il a alors la même fréquence que le signal de référence. En cas d'échec, regardez le paragraphe Conditions de réussite plus bas.

Pour une différence de fréquence initiale donnée entre le GBF de référence et le GBF modulé, la valeur de  $s_f$  est déterminée et unique. Ainsi, quand votre boucle est verrouillée, si vous modifiez l'amplitude  $A$  ou  $B$  d'un des signaux, vous devriez constater un changement dans la différence de phase à l'origine des deux signaux sur votre oscilloscope.

### 3.3 Conditions de réussite

Pour que la boucle puisse se verrouiller, il faut tenir compte de plusieurs critères :

- Il faut que le GBF à synchroniser puisse être modulé en fréquence.
- Il faut que la fréquence du GBF de référence se trouve dans la plage dans laquelle le GBF à synchroniser peut varier (exemple : si le GBF de référence est à 100Hz et le GBF à synchroniser est à 95Hz, réglez la modulation de fréquence sur  $\pm 5$ Hz au minimum (et même plus).
- Il faut que le filtre soit assez sélectif pour éliminer la composante  $\omega_1 + \omega_2$ . Sinon aucune stabilisation n'est possible...
- Il doit tout-de-même laisser passer la composante en  $\omega_1 - \omega_2$ .
- Les amplitudes des signaux  $A$  et  $B$  doivent être assez importantes pour que la bonne valeur de tension puisse être atteinte : sachant que  $g_f$  ne devrait pas dépasser 1, et en connaissant  $g_m$ , faites en sorte que  $A \times B \times g_m \times g_f \times \frac{1}{2}$  soit proche (sans dépassement) de la tension maximale indiquée à l'arrière de votre GBF sur l'entrée modulation.
- Ne grillez pas le GBF modulé avec une tension trop forte sur l'entrée modulation !

## 4 Application à la démodulation de fréquence

On sait maintenant synchroniser un signal sur un signal de référence de fréquence fixée en employant l'entrée modulation du GBF. Maintenant, que peut-il se passer si la référence a elle-même une fréquence variable ?

La boucle à verrouillage de phase se verrouille en général assez rapidement (en moins d'une seconde). Si les variations de fréquence sont assez lentes et peu importantes, alors on peut espérer que le verrouillage sera assez rapide pour suivre les variations de fréquence de la référence, et que le GBF se synchronisera correctement.

Cependant, on a dit plus haut que la tension de sortie du filtre était proportionnelle à la différence de fréquence initiale entre le GBF de référence et le GBF à synchroniser. Ainsi, si le GBF de référence est de fréquence variable, alors la tension de sortie du filtre devrait aussi varier, de manière tout-à-fait corrélée aux variations de fréquence de la référence !

Ainsi, en gardant un montage très similaire, il est possible de démoduler en fréquence un signal modulé qui serait envoyé par le GBF de référence, en visualisant la sortie du filtre à l'oscilloscope.

La seule différence avec le montage précédent est qu'il faut activer la modulation sur le GBF de référence (utilisez si possible ses fonctions internes, c'est plus pratique que de sortir un troisième GBF).

Faites en sorte que les variations de fréquence soient à une fréquence assez basse devant la fréquence du signal, et commencez avec une amplitude faible pour la variation de fréquence (quelques Hz). Vérifiez que les deux GBF se synchronisent correctement.

Visualisez ensuite la sortie du filtre à l'oscilloscope : vous aurez peut-être à utiliser un mode haute résolution pour l'affichage. L'amplitude des variations de fréquence détermine l'amplitude des variations de la sortie du filtre. La fréquence des variations de fréquence donne la fréquence du signal en sortie du filtre.

## Conclusion

La boucle à verrouillage de phase est un montage assez simple (sa complexité se cache peut-être dans le fonctionnement interne des GBF...), c'est une introduction intéressante pour étudier plus généralement les systèmes bouclés et asservissements (le bouclage se fait entre le filtre et l'entrée modulation, le GBF modulé est asservi au GBF de référence). Un usage détourné de ce montage est utilisé pour la démodulation en fréquence : des boucles à verrouillage de phase miniatures (l'acronyme anglais est PLL pour Phase-Locking Loop) équipent en effet la plupart des postes de radios pour écouter les stations FM (comprendre Frequency Modulation) !

## Pour aller plus loin

On vous recommande l'ouvrage de Roger Duffait : *Expériences d'électronique*, sorti aux éditions Bréal.

De même le document disponible à l'adresse suivante :

<https://www.f-legrand.fr/scidoc/srcdoc/sciphys/tpelectro/bouclephase/bouclephase-pdf.pdf>