



Compte Rendu

Ecole Nationale Supérieure de l'Electronique et de ses Applications

Electronique Analogique

TP4 : Boucle à verrouillage de phase

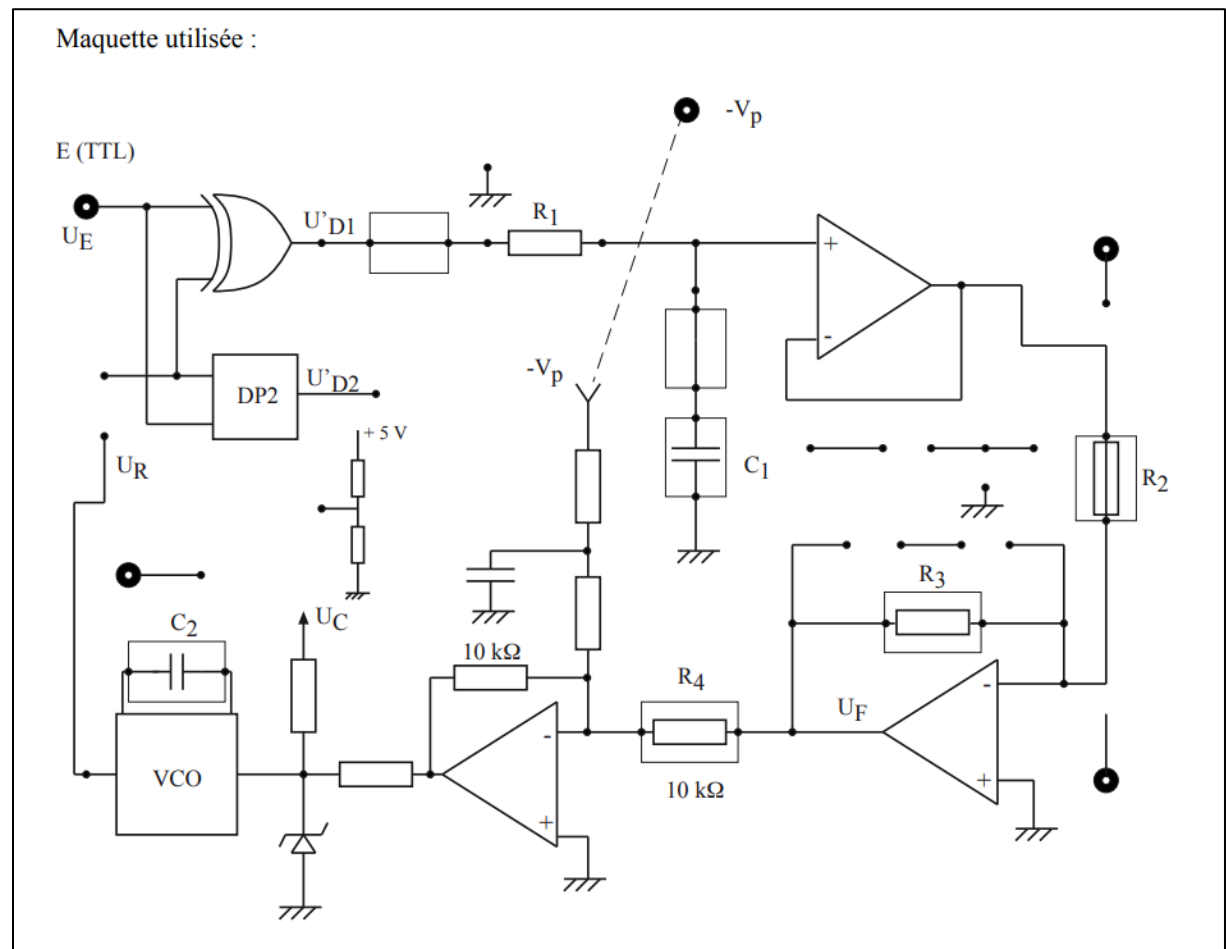
2^{eme} Année

Année : 2023 - 2024

Camille Lanfredi

Rémi Weidle

Introduction



Le montage est composé de :

- 2 détecteurs de phase : un détecteur en OU exclusif et un détecteur séquentiel
- La possibilité d'ajouter un filtre passe-bas adapté pour le détecteur de phase.
- Un amplificateur opérationnel configuré en suiveur, essentielle pour isoler le filtre.
- Un amplificateur inverseur alimenté avec une tension **négative** $[0 ; -V_p]$,
- Un étage additionneur qui permet d'additionner une tension continue.
- La commande du VCO a laquelle il faudra ajouter une capacité

Pour sécuriser le VCO, une diode Zener a été ajoutée à l'entrée du VCO. Cela permet de rester dans la zone de non-destruction du VCO et de ne pas le griller.

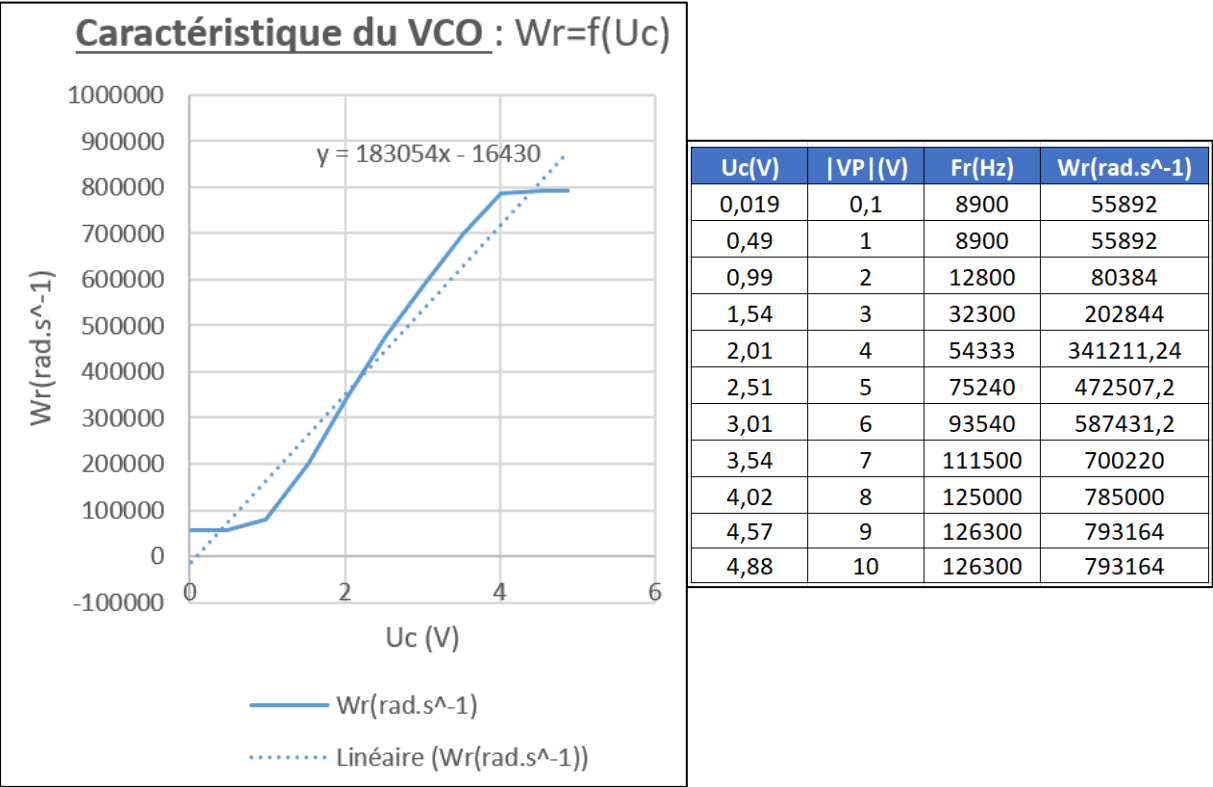
Dans un premier temps, nous allons caractériser le VCO, donc de mesurer la relation fréquence ou la pulsation en fonction de la tension de commande.

1. Régime statique

1.1. Caractéristique du VCO

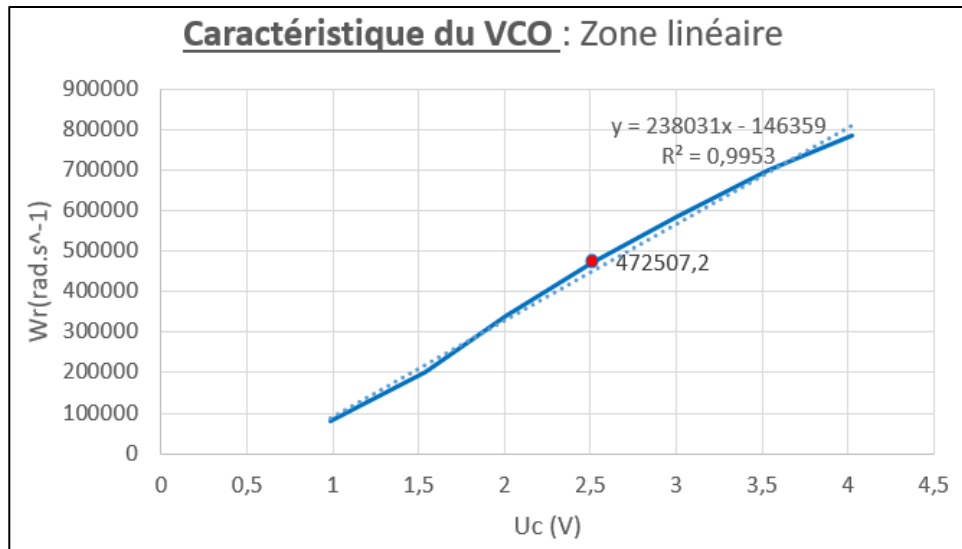
Pour déterminer la caractéristique du VCO, nous allons faire varier l'entrée du VCO, U_c à l'aide d'une alimentation extérieure appliquée au point « $-V_p$ ».

On relève la caractéristique suivante :



De plus, nous savons que la caractéristique a une expression d'une fonction du premier degré, de la forme : $ax+b$, avec K_0 le coefficient directeur de la caractéristique du VCO.

Pour le déterminer, nous devons exprimer son expression en ne conservant que la partie linéaire.



Comme nous pouvons l'observer, le coefficient directeur $K_0 = 238k \text{ rad.s}^{-1}.\text{V}^{-1}$

Par extension :

$$K_0 = 2\pi * K'_0 \Leftrightarrow K'_0 = \frac{K_0}{2\pi} = 37,9k$$

Une fois déterminé, nous devons trouver le point de repos du système.

1.2. Réglage du point de repos

Le ou exclusif fonctionne entre 0 et π et est incapable de savoir quel signal est en avance ou en retard par rapport à l'autre. En général, le point de repos se situe au voisinage de la plage d'alimentation positive et cela dépend également de la stabilité de la boucle mais cela correspond plus ou moins à $\frac{\pi}{2}$. Ici, la fréquence f_r a un déphasage de π sur la fréquence f_e . De plus, u_D possède une fréquence de $2f_e$ ou $2f_r$ quand la boucle est accrochée.

A la suite, nous ajoutons un filtre passe-bas composé d'un RC. Son rôle est de garder la composante continu (la valeur la moyenne) et doit éliminer la composante variable à $2f_e$. Cela signifie fréquence de coupure du filtre choisi doit être très inférieur à $2f_e$. Donc concrètement, nous choisissons un rapport de 100 entre les deux, soit 1% de la valeur de $2f_e$.

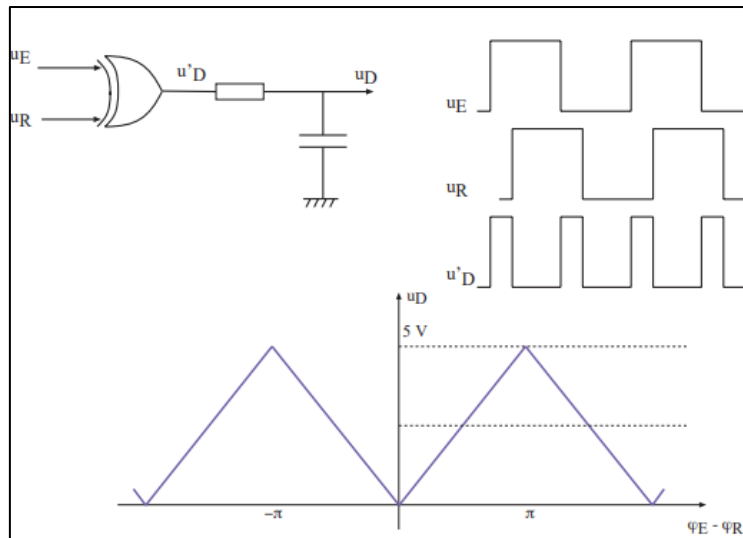
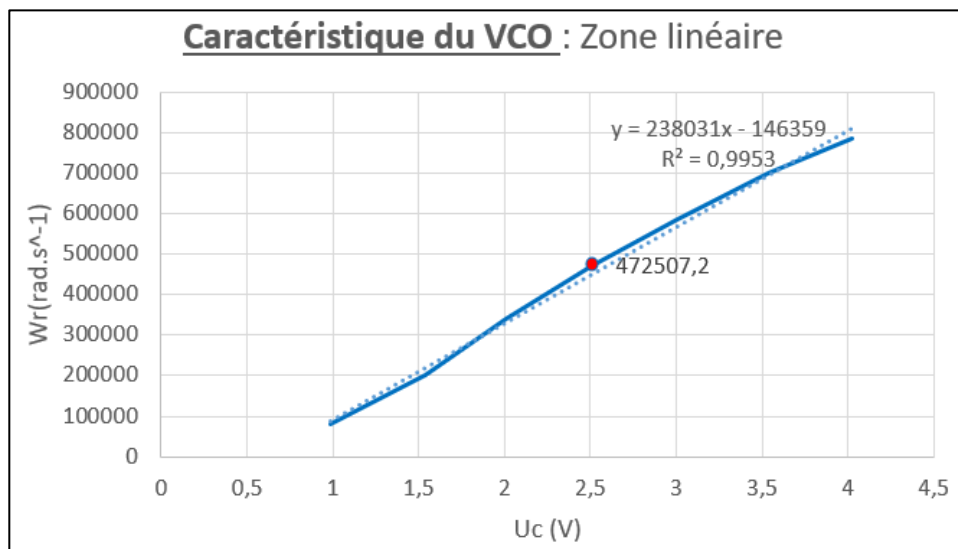


Illustration du fonctionnement du détecteur Ou Exclusif (XOR)

A partir de la zone linéaire de la caractéristique du VCO, nous pouvons trouver les valeurs du point de repos. Celui se trouve au milieu de la zone linéaire. Dans notre cas, il se situe à 2,5V pour 472507 rad.s⁻¹.



Afin que le VCO fonctionne au milieu de la zone de fonctionnement linéaire, on choisit le point de repos tel que $f_{c_0} = \frac{f_{\min} + f_{\max}}{2} \approx \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{472507}{2\pi} = \mathbf{75201Hz}$.

Puis pour déterminer la fréquence de coupure du filtre,

$$2f_e = 2f_{co} \gg 1/(2\pi * RC) = 1\% \text{ de } 2f_e$$

$$2f_e = 150kHz$$

Donc

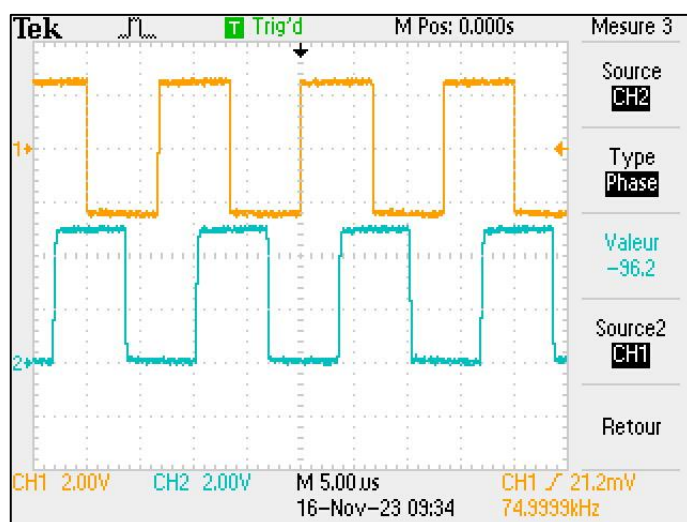
$$1/(2\pi * RC) = 1.5kHz$$

Pour déterminer le couple R_1C_1 pour un fonctionnement correct à la fréquence f_e , nous fixons la résistance R_1 à $10k\Omega$ et obtenons une valeur du condensateur C_1 à $10nF$. Soit un rapport expérimental de 94, au lieu des 100 expérimentale.

Pour imposer $f_0 = \frac{R_3}{R_2} = 0,2$; nous utilisons les valeurs suivantes : $R_2 = 10k\Omega$ et $R_3 = 2,2k\Omega$.

Nous appliquons un signal d'entrée TTL (logique [0 ; 5]V) donc carré à l'entrée de la boucle et on règle - V_P de façon à ce que le VCO fonctionne à la fréquence f_{C0} . Puis un signal d'entrée $u_E(t)$ de fréquence $f_E = f_{C0}$. Une fois le système verrouillé sur f_e ,

Voici le chronogramme obtenu :



Chronogramme de la boucle de verrouillage : tension d'entrée : U_e (jaune) et tension de sortie U_r (bleu)

Nous observons bien que la tension de sortie est verrouillée (ou suit) la tension d'entrée avec un déphasage $\varphi_E - \varphi_R$ de 96° soit quasiment $\pi/2$, en milieu de plage.

Le déphasage se mesure entre le déphasage du canal 2 (U_r) par rapport au canal 1 (U_e).

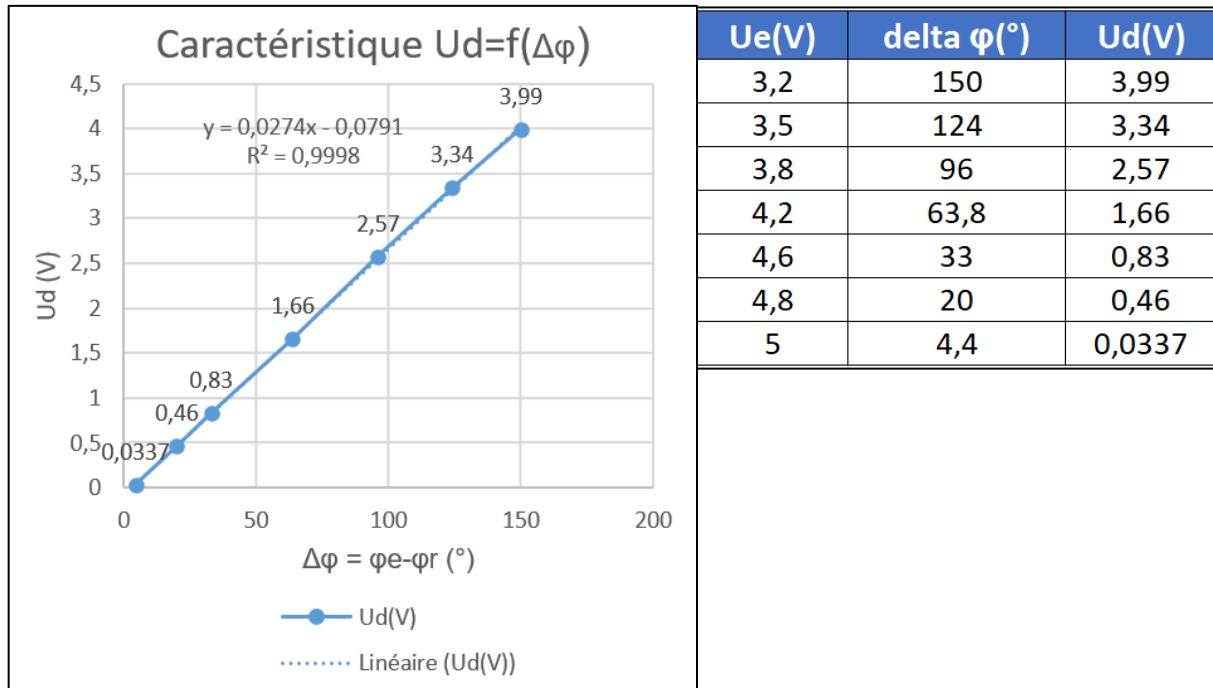
Rappel : pour être dans la zone verrouillée :

- Alimentes-en - 4.8V
- Une fréquence de fonctionnement de 75kHz
- Une différence de phase de $\approx 90^\circ$ en milieu de plage
- Variation de U_e entre 3 et 5V

1.3. Fonctionnement du détecteur de phase

Une fois la boucle est verrouillée avec $f_E = f_{C0}$. Nous faisons varier $|V_P|$, tension d'alimentation négative, et mesurer la caractéristique du détecteur de phase $U_D = f(\varphi_E - \varphi_R)$.

On relève la caractéristique suivante :

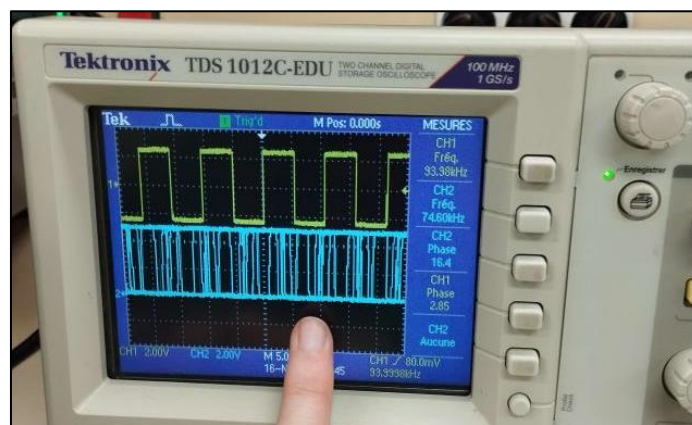


1.4. Plage de verrouillage et plage de capture

La plage de verrouillage représente la gamme de fréquences autour du point de fonctionnement où le système peut suivre et verrouiller sur un signal d'entrée. D'un autre côté, la plage de capture indique la gamme de fréquences pour lesquelles le système peut capturer et maintenir le verrouillage sur un signal d'entrée. Donc la plage de capture est toujours incluse dans la plage de verrouillage.

Pour déterminer la plage de verrouillage, nous devons, à partir du point de fonctionnement, aller jusqu'aux extremum des plages de fréquence. Tandis que pour la plage de capture nous procédons en sens inverse.

Voici ci-dessous, le résultat si le signal quitte la zone de verrouillage :



Nous obtenons donc les résultats suivants :

- Plage de verrouillage : [52 ; 95] kHz
- Plage de capture : [68 ; 81] kHz

En outre, en augmentant les valeurs de composants tels que R1 ou C1, la constante de temps du système augmente, réduisant ainsi la largeur de la plage de capture.

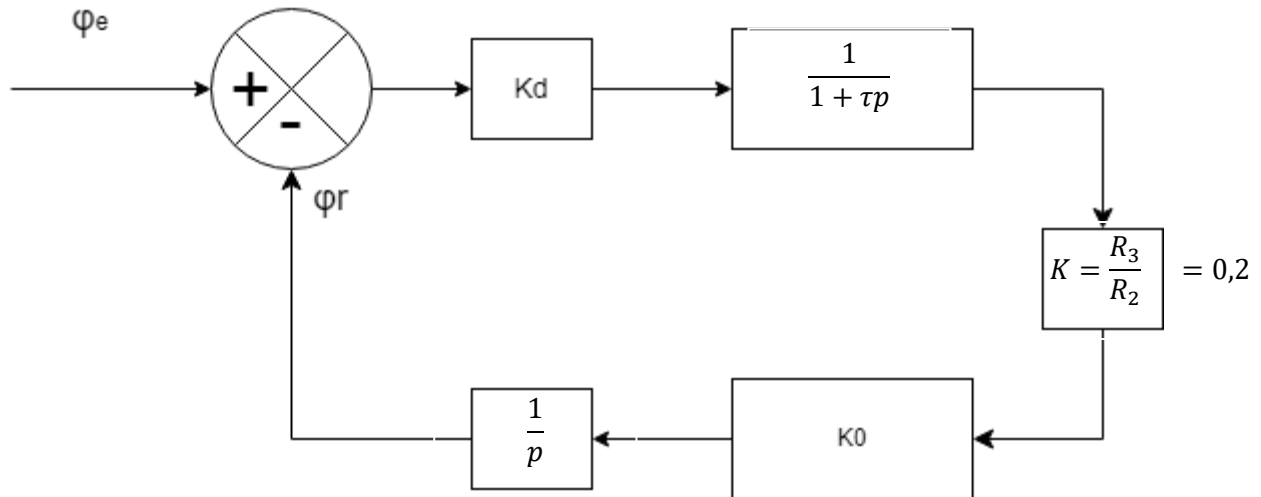
Si on modifie baisse la valeur de la capa, on change uniquement la plage de capture, la plage de verrouillage dépend de la tension comprise entre [0 ;5] V. Si on divise la bande passante, la plage de capture se réduit mais le filtre passe-bas sera plus efficace car $\frac{1}{2\pi RC}$ sera plus faible.

Il faut noter qu'après le filtre il reste des résidus de la fréquence $2f_e$ dans la commande du VCO, ce qui donne une petite instabilité de fréquence du VCO à la fréquence $2f_e$. Donc la tension ne sera pas parfaitement stable.

En résumer, nous pouvons augmenter la plage de capture au prix d'une moins bonne qualité de la stabilité de la fréquence de coupure. Nous pouvons appeler ce phénomène du **bruit de phase**.

2. Fonctionnement en régime dynamique

Fonctionnement en régime dynamique : Schéma dynamique de la boucle



K_d correspond à la constante du détecteur de phase (pente du détecteur de phase $U_D = f(\varphi_E - \varphi_R)$ | **Voir 1.3**). Puis vient le filtre avec $\tau = R_1 C_1$. Puis le coefficient K , puis le VCO caractérisé par K_0 et enfin le repassage en phase avec un intégrateur (de la pulsation à la fréquence).

La fonction transfert du schéma est donc :

$$\frac{\varphi_R}{\varphi_E} = \frac{K_D * \frac{1}{1+\tau p} * K * \frac{K_0}{p}}{1 + \frac{K_D}{1+\tau p} * K * \frac{K_0}{p}} = \frac{K_D * K * K_0}{(1+\tau p)p + K_D * K * K_0} = \frac{1}{1 + \frac{p}{K_D * K * K_0} + \frac{\tau p^2}{K_D * K * K_0}}$$

La fonction transfert correspond à un filtre passe-bas de 2nd ordre. Puis nous déterminons ses paramètres :

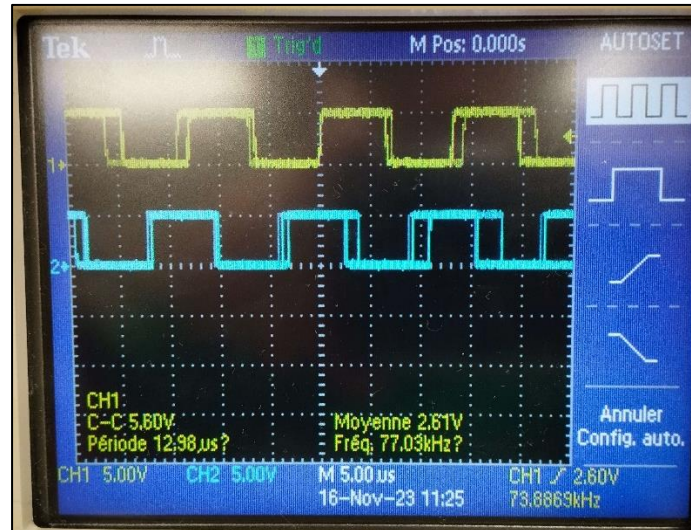
- Son gain statique $A_0 = 1$
- $\omega_0 = \sqrt{\frac{K_D * K * K_0}{\tau}}$
- $m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_D * K * K_0}{\tau}} * \frac{1}{K_D * K * K_0} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\tau * K_D * K * K_0}}$

On cherche à obtenir le régime transitoire, soit le temps de réponse à 5% sur φ_R lorsque que l'on met un échelon sur φ_E , ou sur f_r lorsque que l'on met un échelon sur f_e .

2.1. Réponse à un échelon de fréquence

Il faut 2 points dans la plage de capture [71 ; 77]kHz et un temps de réponse de 20Hz. Cependant avec notre oscilloscope la FSK s'arrête, il faut redémarrer le gbf.

Nous pouvons donc commencer la manipulation. Nous regardons la tension ici :



Chronogrammes des tensions d'entrée (jaune) et sortie(bleu) de la boucle

Nous voulons obtenir la réponse en fréquence du VCO à la variation de fréquence du signal d'entrée, qui est l'image de la variation de fréquence de la variation de tension de commande. Pour cela, nous allons regarder avant la jonction de la tension $-V_p$

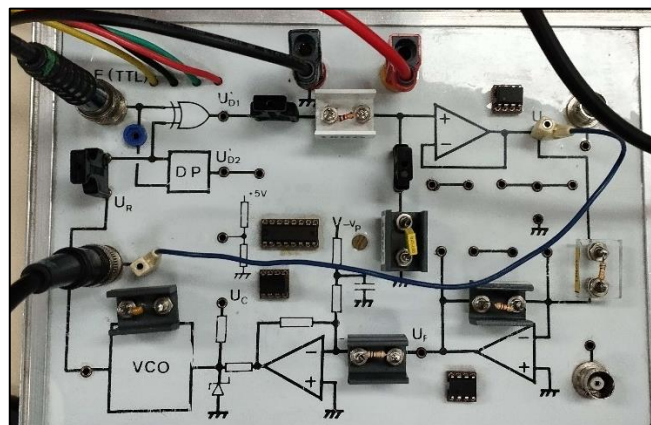


Photo du montage

Et enfin, nous augmentons légèrement la sensibilité et la base de temps et voici ce que nous obtenons :

Une réponse de type 2nd ordre.



Photo des dépassements en régime transitoire d'un 2nd ordre

- 1^{er} dépassement : 0,520V
- 2^e dépassement : 0,240V

En dehors du régime transitoire, la réponse est dite « sale ». Cela est due au résidu $2f_c$ non supprimer par le filtre.

Pour améliorer la stabilité, nous utilisons une synchronisation externe car en FSK la sortie synchro du générateur et synchro des changements de fréquence.

Désormais, nous allons déterminer le coefficient d'amortissement de la boucle m. Pour cela, nous utilisons l'expression du décrétement logarithmique :

On définit le logarithme du rapport de deux dépassements successifs de même sens :

$$\delta = \ln \frac{s_1(kT/2)}{s_1(kT/2 + T)} = \frac{2m\pi}{\sqrt{1-m^2}}$$

δ est appelé **décrétement logarithmique**

Le décrétement logarithmique est le rapport entre 2 dépassements successifs par rapport à la valeur finale.

En utilisant la formule :

$$\delta = \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right) = \frac{2m\pi}{\sqrt{1-m^2}}$$

En utilisant la formule :

$$\delta = \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right) = 0.77 = \frac{2m\pi}{\sqrt{1-m^2}}$$

Nous pouvons négliger le dénominateur car la valeur le coefficient d'amortissement est faible.

$$m = \frac{\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)}{2\pi} = 0,12$$

2.2. Optimisation vis-à-vis du temps de réponse

Pour avoir

$$m = 0,69 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\tau * K_D * K * K_0}}$$

On isole τ dans la formule :

$$\tau = \frac{1}{4 * m^2 * K_D * K * K_0} = 402,6\mu s = R_1 C_1$$

Pour $C_1 = 47nF$, nous obtenons $R_1 = 8566\Omega$ théorique soit environ une résistance normalisée de 8200Ω . Il faut penser à changer la plage de capture : $[73 ; 75,2]kHz$.

Voici le résultat :

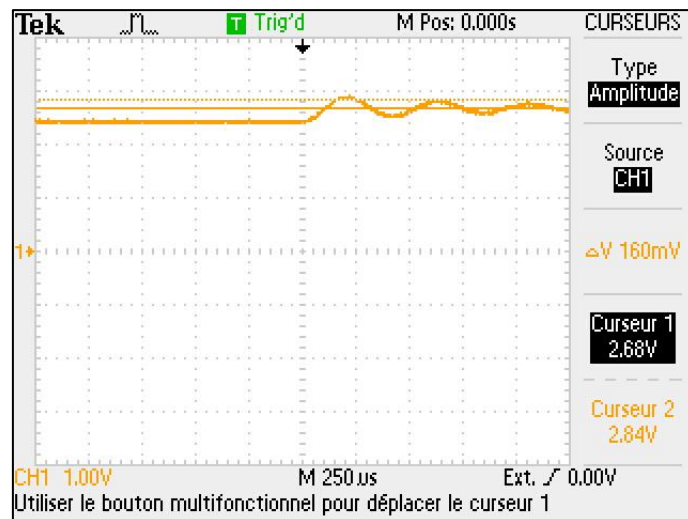


Photo des dépassements en régime transitoire d'un 2nd ordre optimisé

Il atteint le 5% de temps de réponse à partir de $480\mu s$.

Nous pouvons observer que les oscillations sont plus faibles. Cela prouve que le système est optimisé. Le système est donc plus précis.

En résumé il faut diminuer le τ , donc augmenter la fréquence de coupure donc la tension u_D est moins filtrée due aux résidus de fréquence $2f_c$.