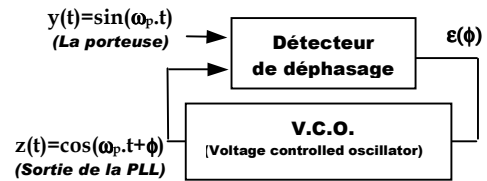


Programme
de la séance

La détection synchrone étudiée en TD et en TP impose la synthèse d'un signal de même fréquence et en phase avec la porteuse au niveau du récepteur. Une Boucle à verrouillage de phase (PLL) dont le schéma fonctionnel est représenté ci-contre, est un système qui permet d'assurer une relation angulaire constante entre son entrée $y(t)$ et sa sortie $z(t)$.



La solution adoptée ici assure une sortie en quadrature de phase avec la porteuse. Par conséquent, avec les notations que venons d'adopter, l'angle ϕ désignera une erreur que l'adaptation du VCO tentera de minimiser.

La PLL est donc un système bouclé dont les propriétés de convergence et de stabilité peuvent être analysées d'une manière très complète [1] comme tous les autres systèmes asservis. L'étude d'aujourd'hui, beaucoup plus élémentaire, sera basée sur l'approche numérique d'un problème d'optimisation.

Pour tous les calculs numériques qui suivent, les étudiants se placeront dans le cas d'une porteuse $f_p = 1500\text{Hz}$.

I. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

OPTIMISATION D'UN CRITERE

Q1*. Afin de trouver numériquement le minimum d'une fonction (erreur) quadratique $\varepsilon^2(\phi)$ nous pouvons nous inspirer de la méthode de Newton que nous appliquons à la recherche des solutions de :

$$\frac{d\varepsilon^2(\phi)}{d\phi} = 0$$

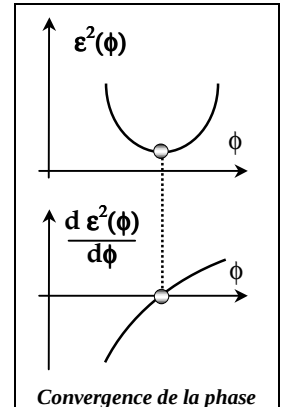
Les figures ci-contre illustrent qualitativement l'allure de $\varepsilon^2(\phi)$ et de sa dérivée au voisinage de la solution optimale.

Cette solution optimale est un état d'équilibre de la boucle à condition que les variations de celle-ci obéissent à une **règle d'adaptation** de la forme :

$$\frac{d\phi}{dt} = \mu \cdot \frac{d\varepsilon^2(\phi)}{d\phi}$$

0 pt

- Quelles sont les valeurs de μ qui assurent la stabilité de cet état d'équilibre (>0 , <0 , ...)?
- Vérifier alors que cette stabilité ne peut plus être assurée pour les maximums de $\varepsilon^2(\phi)$.



II. L'OSCILLATEUR COMMANDE EN TENSION (V.C.O.)

LINEARITE DE LA COMMANDE

Saisir un VCO (**Comm/Signal_Sources/VCO_Real**) dans une autre fenêtre de COMMSIM et procéder à son paramétrage comme cela est indiqué (fig.1).

2 pts

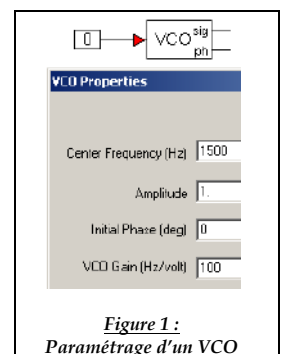
Q2. Mesurer à partir de son spectre, la fréquence des oscillations pour une entrée de commande nulle : $V_k = 0$.

- Refaire la même expérience pour $V_k = 1\text{V}$ et $V_k = -1\text{V}$. Commentaires.
- En déduire la linéarité de la fréquence de l'oscillateur en fonction de sa commande d'entrée V_k , de sa sensibilité λ (Hz/V) et de f_p .

NON-LINEARITE D'ENTREE-SORTIE

1 pt

Q3. Attaquer le VCO avec un signal sinusoïdal lentement variable (ex : 300Hz) et relever le spectre de sa sortie pour différentes valeurs du gain du VCO: $\lambda = 300\text{Hz/V}$, $\lambda = 100\text{Hz/V}$, $\lambda = 30\text{Hz/V}$. Commentaires.



ANGLE DE DEPART DU VCO

1 pt

Q4. Mesurer le déphasage entre la sortie du VCO et un signal sinusoïdal de même fréquence en l'absence de commande $V_k = 0$ avec **Initial_Phase (deg) = 0**.

III. DETECTION ET MESURE D'UNE PHASE

LE PRINCIPE DE LA MESURE

2 pts

Q5*. Montrer qu'un **filtrage particulier** appliqué au produit $y(t) \times z(t)$ des entrées du détecteur permet la détection de leur déphasage ϕ . Expliciter l'expression de l'erreur ε ainsi que la règle de l'adaptation de ϕ (cf. Q1) en se plaçant dans l'approximation $\sin \alpha \approx \alpha$ pour $\alpha \ll 1$.

SIMULATION ET CALCULS

2 pts

Q6. Saisir le schéma fonctionnel de ce dispositif avec $\lambda=100\text{Hz/V}$ pour le VCO et un filtre du **premier degré** et de coupure $f_c=10\text{Hz}$.

- Placer les fenêtres graphiques de manière à pouvoir observer le spectre du produit des signaux ainsi que la sortie du filtre (figure 2).
- Relever ces observations pour des déphasages compris entre $-\pi/2$ et $+\pi/2$. (pas: $\pi/6$).
- Représenter graphiquement la sortie du filtre en fonction de la phase ϕ .
- Commenter la linéarité de cette détection.

OPTIMISATION DE LA MESURE

1 pt

Q7. Fixer ϕ à $+\pi/4$ et examiner l'influence de f_c sur la vitesse et la précision de la mesure.

1 pt

Q8. Fixer ϕ à $+\pi/4$ et f_c à 500Hz .

- Examiner l'influence de l'ordre n du filtre sur les performances de la mesure.
- Optimiser expérimentalement l'ordre et la fréquence de coupure du filtre.

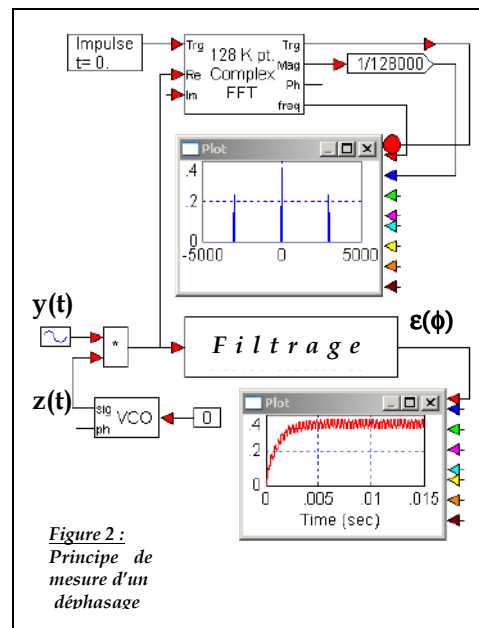


Figure 2 :
Principe de
mesure d'un
déphasage

IV. ASSERVISSEMENT DE PHASE

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

2 pts

Q9. Le VCO est donc le siège d'un signal FM $z(t)=\cos[\theta(t)]$ centré autour de f_p , sa fréquence instantanée s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \omega(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} [\omega_p \cdot t + \phi(t)] \quad \text{et nous avons par construction : } f(t) = f_p + \lambda \cdot V_K.$$

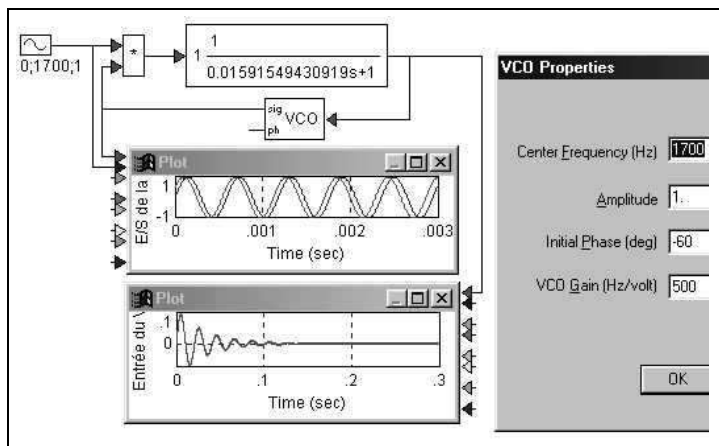
- Expliciter la règle de l'adaptation de ϕ en fonction de λ et discuter sa convergence en précisant les états d'équilibre de la boucle et leur stabilité.

ASSERVISSEMENT DE PHASE

4 pts

Q10. Examinons donc un simple verrouillage de phase pour une entrée sinusoïdale à 1500Hz .

- Saisir la boucle en commençant avec un filtre du premier degré de fréquence de coupure 10Hz .
- Relever les signaux indiqués ci-dessous pour différentes valeurs de ϕ (Initial Phase) : -90° , -60° , -30° , 0° .
- Justifier la valeur finale de V_K à l'issue de chaque simulation.
- Examiner le rôle des paramètres λ , f_c et n sur la vitesse et la précision de la PLL. **Optimiser sa convergence.**
- Relever la valeur du déphasage entre le VCO et le signal d'entrée de la boucle au début et à la fin de d'une simulation pour Initial Phase= -60° par exemple. Commentaires.



APPLICATION : DETECTION SYNCHRONE

3 pts

Q11. Remplacer la source d'entrée par un signal AM de porteuse 1500Hz modulé par un signal sinusoïdal de fréquence 150Hz avec un indice de $0,5$.

- Quelle est la relation de phase entre la sortie du VCO et la porteuse ?
- Dédurre de cette observation le schéma fonctionnel d'un détecteur synchrone pour une démodulation AM.

ASSERVISSEMENT DE FREQUENCE

1 pt

Q12. Simuler la PLL avec en entrée un signal de fréquence 1400Hz .

- Observer les différents signaux d'E/S et relever la valeur finale de V_K .
Commentaires. (Etude à suivre en projet...)

POUR EN SAVOIR PLUS

[1] J. Encinas. « Systèmes à verrouillage de phase », Masson Ed. 1989. ISBN 2-225-81986-6.

[2] <http://www.physique.ens-cachan.fr/pagregp/enseignement/elec/electronique/t%E9I%E9com.pdf>

[3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Boucle_%C3%A0_phase_asservie