

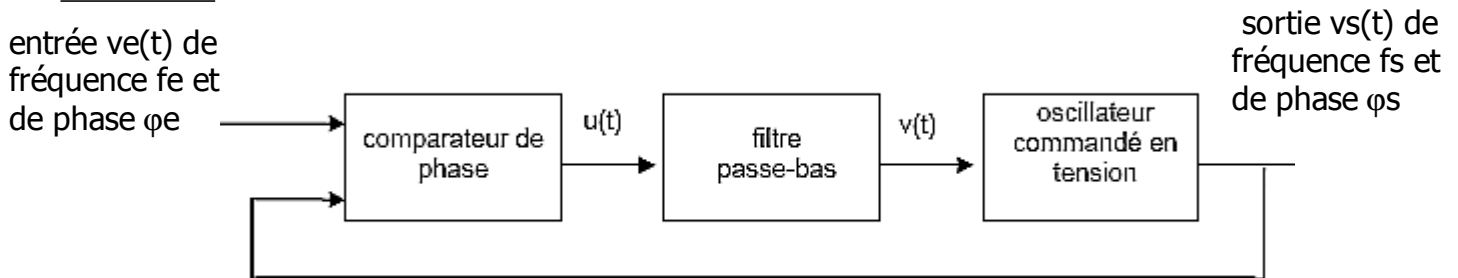
Annexe 1 : Boucle à verrouillage de phase (Phased Locked Loop : PLL)

1) constitution et principe de fonctionnement d'une PLL.

La boucle à verrouillage de phase est un montage permettant, sous certaines conditions, d'asservir la phase du signal de sortie à celle d'un signal placé à l'entrée.

Lorsqu'on a $f_s = f_e$, on dit que la boucle est verrouillée.

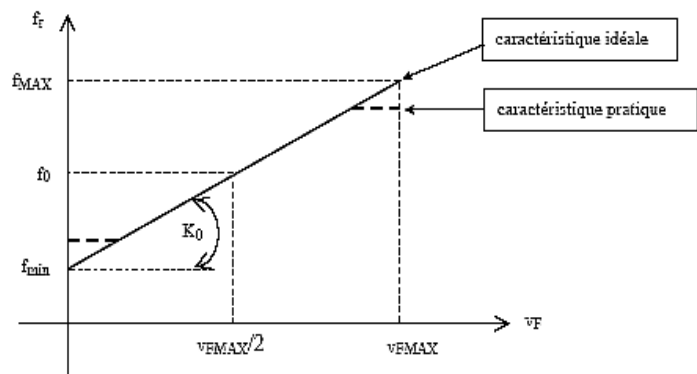
Constitution :



● Oscillateur Commandé en Tension (Voltage Controlled Oscillator) : donne un signal $v_s(t)$ sinusoïdal ou carré de fréquence telle que $f(t) = f_0 + k_0 \cdot v(t)$ où f_0 est la fréquence centrale de l'oscillateur et k_0 la pente du VCO.

$$k_0 = \frac{\Delta f}{\Delta v} \text{ en Hz / V}$$

La caractéristique du VCO est de la forme :

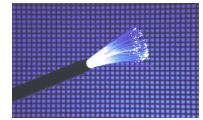


● Comparateur de phase : dispositif qui délivre une tension $u(t)$ caractérisée par :
 - une composante continue proportionnelle à $(\phi_e - \phi_s)$.
 - des harmoniques de fréquence $2 \cdot f_e$, $4 \cdot f_e$, ...

Le comparateur de phase peut être soit analogique (multiplieurs, comme dans le cas de la détection synchrone) ou numérique (OU exclusif).

Le multiplieur ne donne une courbe linéaire qu'autour de $(\phi_e - \phi_s) \approx \pi/2$ et la pente de la courbe dépend des amplitudes de $v_e(t)$ et de $v_s(t)$.

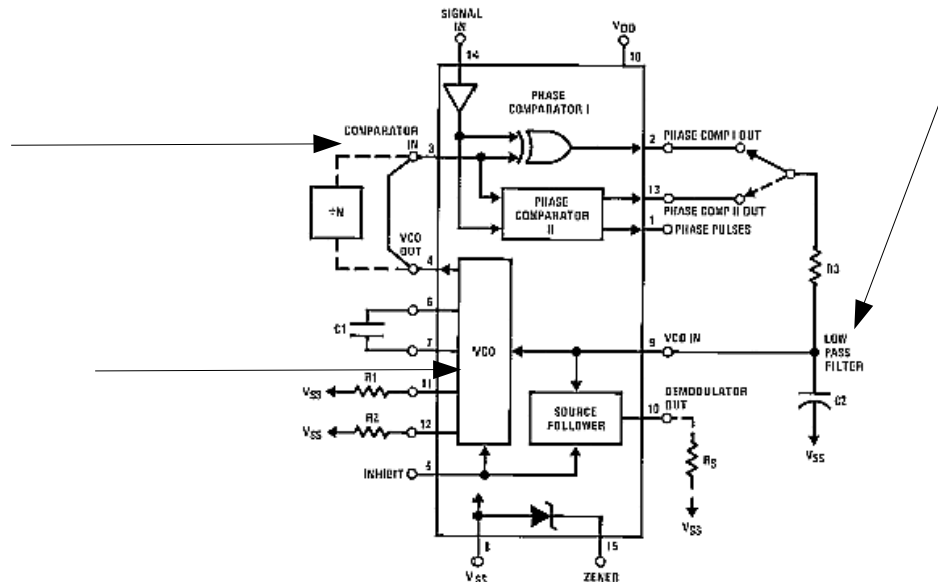
Le OU exclusif a une caractéristique linéaire mais les signaux doivent être de rapport cyclique $1/2$ et la boucle peut se verrouiller sur des harmoniques de la tension d'entrée (la boucle peut être verrouillée avec $f_s = 2 \cdot f_e$, $3 \cdot f_e$, ...)



● filtre passe-bas : ce filtre est utilisé pour filtrer les harmoniques de $u(t)$. Il est souvent composé d'un circuit RC.

Exemple de la PLL basée sur le circuit 4046 utilisé en TP :

Block Diagram



Principe de fonctionnement :

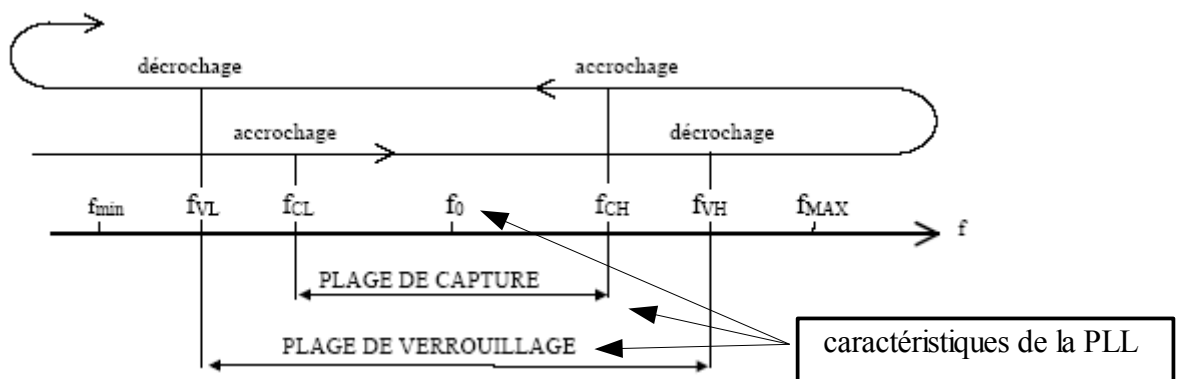
- en l'absence de signal $v_e(t)$ d'entrée, ou si le signal d'entrée a une fréquence trop grande ou trop petite, le signal de sortie a une fréquence égale à la fréquence centrale du VCO, à savoir f_0 .

La PLL est non-verrouillée et $f_s = f_0$.

- si la fréquence du signal d'entrée est voisine de f_0 , la PLL se verrouille, c'est-à-dire que la fréquence du signal de sortie suit la fréquence du signal d'entrée. Ceci se passe après un très court instant où les signaux $u(t)$ et $v(t)$ sont en régime transitoire.

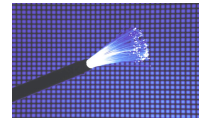
Boucle verrouillée : $f_s = f_e$.

- si la fréquence du signal d'entrée sort de la plage de verrouillage, la boucle décroche et on retrouve l'état : $f_s = f_0$



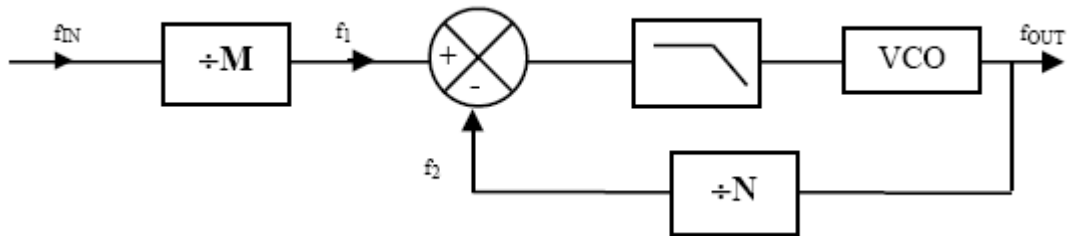
En simplifiant on peut dire que :

- la plage de capture dépend plutôt de la bande passante du filtre.
- la plage de verrouillage dépend plutôt des fréquences extrêmes du VCO.
- la plage de verrouillage est plus large que la plage de capture.



2) utilisations d'une PLL.

- synthèse de fréquence :



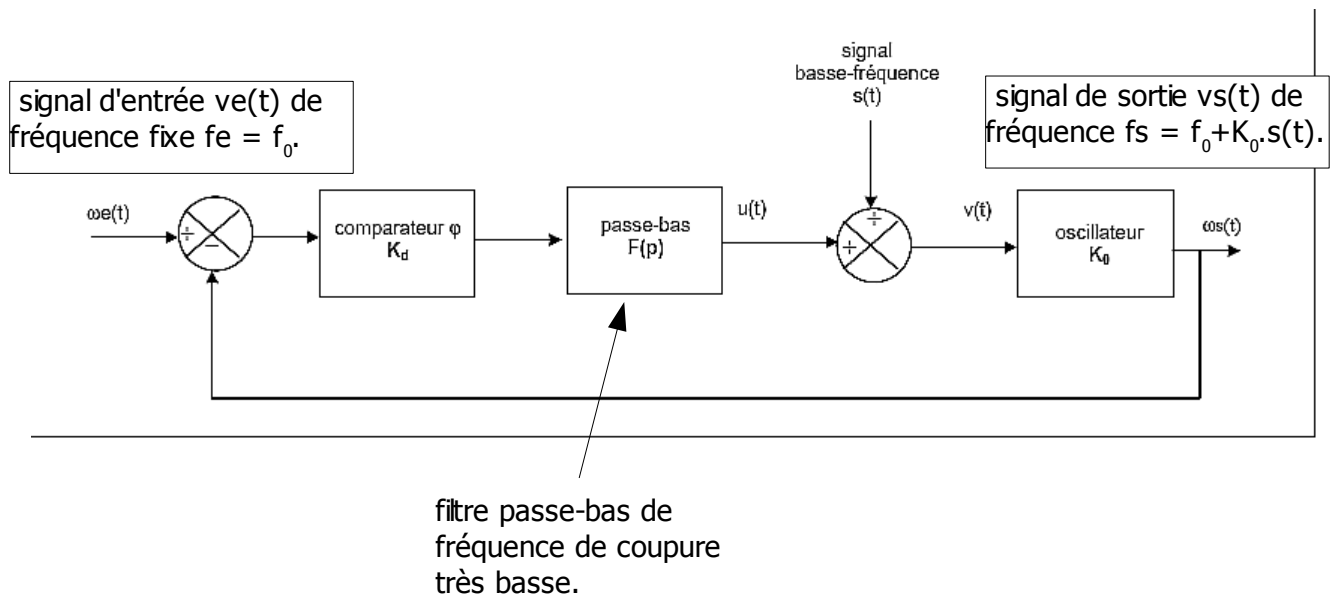
Lorsque la boucle est verrouillée : $f_{OUT} =$

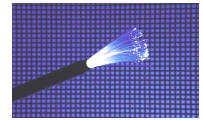
(voir TP 3)

pour un tuner FM, on cherche à régler des fréquences dans la gamme 88 à 108 MHz par pas de 50 kHz.

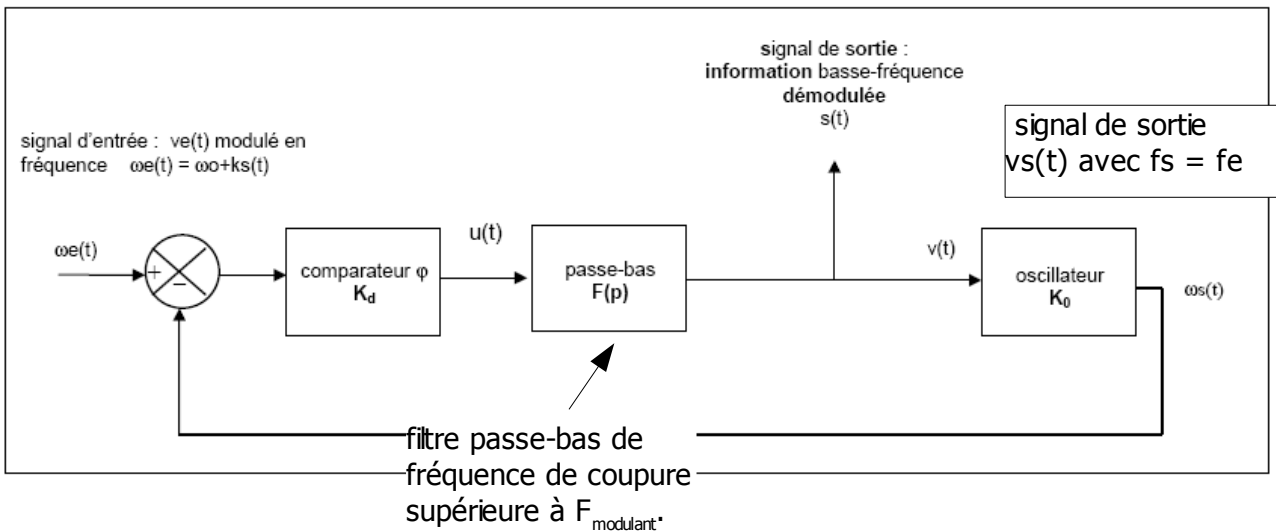
On pourra choisir $f_{IN} = 1$ MHz et $M = 20$ (soit $f_2 = f_{IN}/M = 50$ kHz), et N sera variable de 1760 à 2160.

- synthèse d'un signal FM :





● démodulation d'un signal FM :

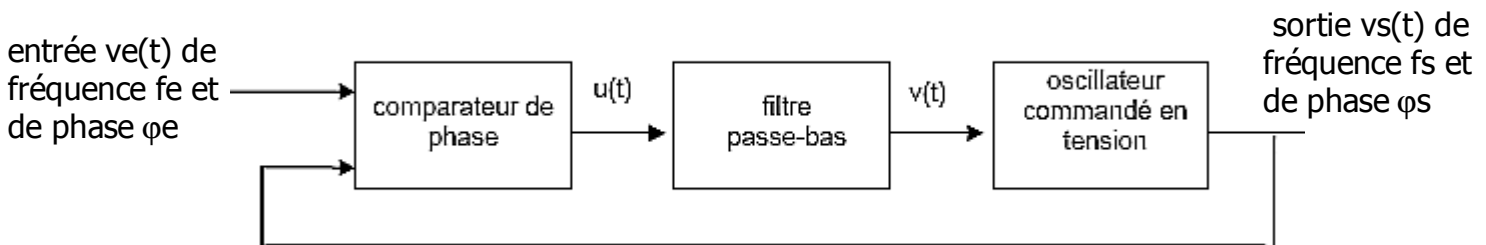


Lorsque la boucle est verrouillée, $f_s = f_e = f_0 + k_f \cdot s(t)$ donc cela veut dire que : $v(t) =$ (voir TP 4)

On ajoute un condensateur pour éliminer la composante continue V_0 .

3) modélisation d'une PLL.

On rappelle les différents blocs du système asservi et on dessine le schéma fonctionnel de la boucle :

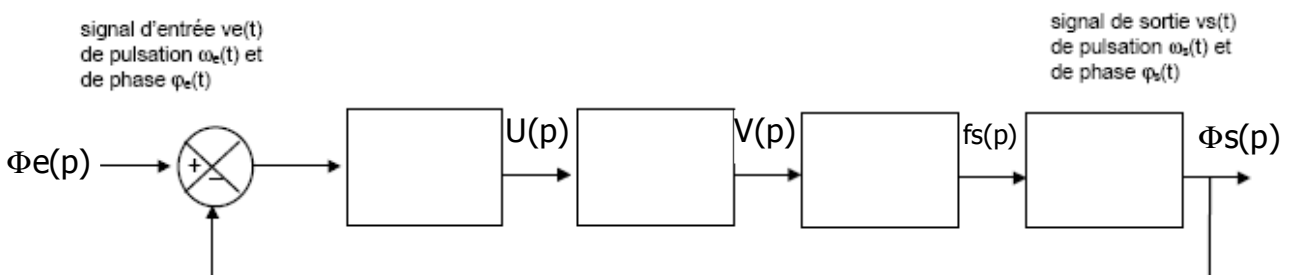


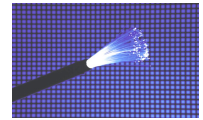
Le comparateur de phase donne un signal $u(t)$ proportionnel à la différence $(\varphi_e - \varphi_s)$ avec la constante de proportionnalité K_d .

Le filtre passe-bas est caractérisé par sa transmittance de Laplace $F(p)$.

Le VCO donne un signal de fréquence $f_s = f_0 + k_f \cdot v(t)$ et on rappelle que $f_s(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d\varphi_s}{dt}$

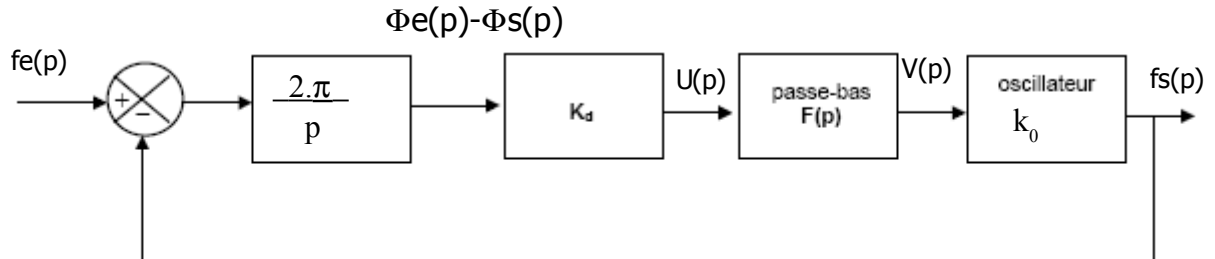
En utilisant alors les notations de Laplace et pour des variations autour du point $f = f_0$:





La transmittance en boucle ouverte est : $T_{BO}(p) = \frac{\Phi_s}{\Phi_e} = \frac{k_0 \cdot K_d \cdot F(p)}{p}$

On peut alors simplifier ce schéma fonctionnel de manière à faire apparaître les grandeurs f_e et f_s en entrée et en sortie :



La transmittance en boucle ouverte est : $H_{BO}(p) = \frac{f_s(p)}{f_e(p)} = \frac{k_0 \cdot K_d \cdot F(p)}{p}$

Transmittance en boucle fermée : $H_{BF}(p) = \frac{f_s(p)}{f_e(p)} =$

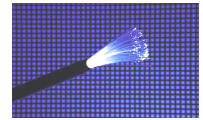
Si le filtre passe-bas est un filtre RC (du premier ordre) : $F(p) =$

Alors, $T(p) =$

Le système est du second ordre de la forme : $T(p) = \frac{T_0}{1 + 2 \cdot m \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right) + \left(\frac{p}{p_0}\right)^2}$

avec : $m =$ et $p_0 =$

L'erreur de position vaut :



Exercices sur la PLL :

exercices QCM :

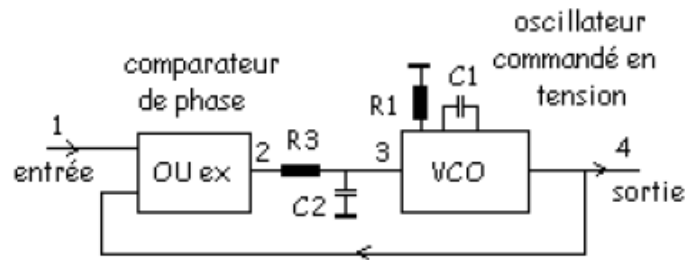
a) Une PLL est constituée obligatoirement de :

- a) un oscillateur de référence à l'entrée
- b) un comparateur de phase
- c) un filtre passe-bande
- d) un oscillateur commandé en tension
- e) un diviseur dans la boucle de retour

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

b)

3 On s'intéresse à une pll de structure classique utilisant un OU exclusif comme comparateur de phase, et un VCO couvrant la plage allant de f_1 à f_2 :



- a) ce comparateur de phase accepte un signal d'entrée carré ou sinusoïdal
- b) le filtre passe-bas R_3C_2 sert à filtrer les petits parasites affectant le signal
- c) la boucle ne peut pas fonctionner en-dehors de la plage de f_1 à f_2
- d) si la fréquence d'entrée sort de la plage du VCO, la boucle sature
- e) si la fréquence à l'entrée est entre f_1 et f_2 la boucle peut se verrouiller

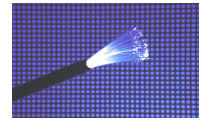
Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

c)

4 On injecte dans la boucle précédente un signal dont la fréquence f_0 est fixe et égale à la fréquence centrale du VCO. Les circuits sont alimentés en 5V.

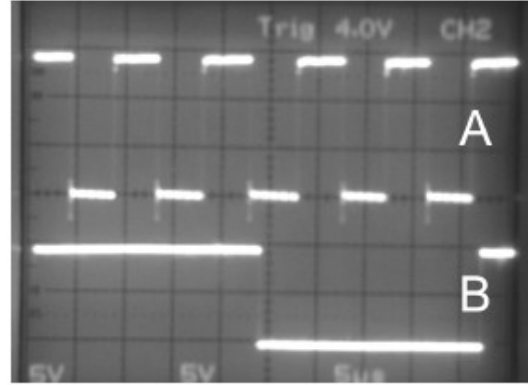
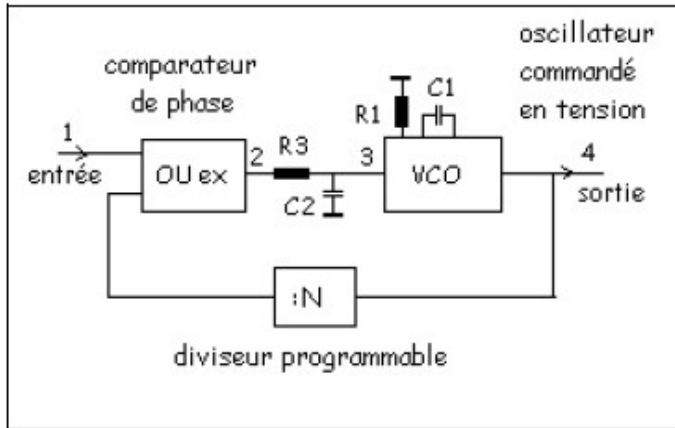
- a) la tension à l'entrée du VCO est égale à 2,5V
- b) la tension à l'entrée du VCO est parfaitement continue
- c) la fréquence en sortie du OUEX est égale à f_0

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



d)

6 Une pll est équipée d'un diviseur dans la boucle de retour :

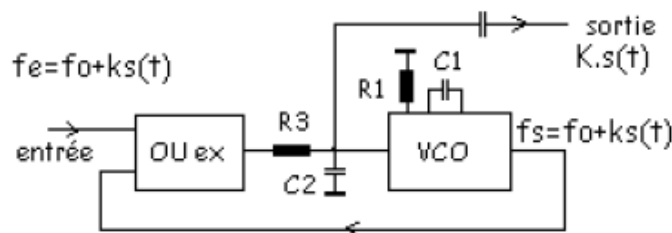


- a) le signal A représente le signal d'entrée et B le signal de sortie
- b) les fréquences à l'entrée du comparateur de phase sont toujours égales dans une pll
- c) grâce au diviseur, le signal de sortie est plus stable que le signal d'entrée
- d) la fréquence de sortie f_s est de la forme $f_s = N \cdot f_e$

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

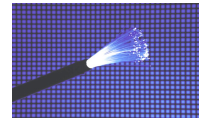
e)

7 Une boucle à verrouillage de phase est attaquée par un signal dont la fréquence varie autour de f_0 en fonction d'un signal audio $s(t)$:



- a) le signal injecté est un signal modulé en fréquence
- b) la fréquence du VCO va suivre les variations de la fréquence du signal d'entrée
- c) la tension de commande du VCO va suivre les variations de la fréquence d'entrée
- d) le montage est un démodulateur de fréquence
- e) la fréquence de coupure du filtre RC est indépendante de $s(t)$

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



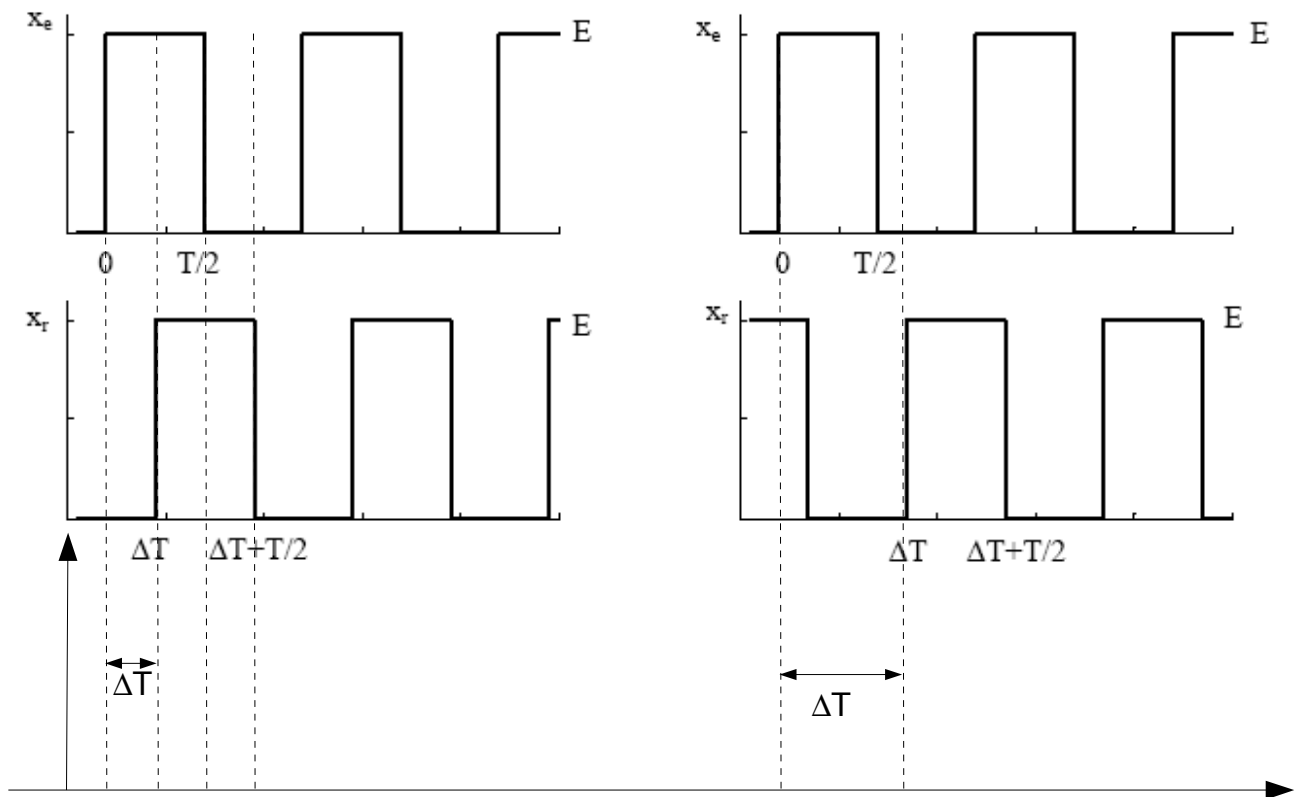
exercices sur les comparateurs de phase :

a) montrer qu'on peut faire un comparateur de phase avec un multiplieur suivi d'un filtre passe-bas tel que les deux signaux d'entrée $v_e(t) = \hat{V}_e \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_e)$ et $v_s(t) = \hat{V}_s \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_s)$ donnent en sortie du multiplieur un signal $u(t) = K_0 \cdot v_e(t) \cdot v_s(t)$

Donner les limitations d'un tel montage.

b) on veut utiliser un montage OU exclusif suivi d'un filtre passe-bas pour effectuer un comparateur de phase.

Compléter les chronogrammes ci-dessous en complétant le signal de sortie du OU exclusif si les signaux d'entrée du OU exclusif sont x_e et x_r .



Exprimer la valeur moyenne de $u(t)$ en fonction de ΔT , E et T dans les deux cas.
Donner la correspondance entre le décalage temporel ΔT et le déphasage $\Delta \varphi$.

Tracer la courbe $\langle u \rangle$ en fonction de $\Delta \varphi$.