

Éléments de correction

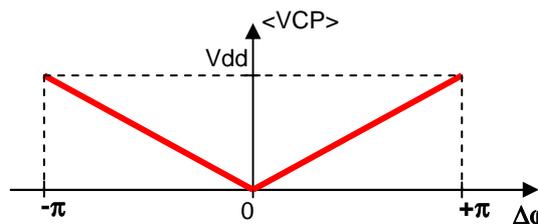
Problème n°4 : Pour apprendre à siffler

Q1 : PLL : Phase Locked Loop. Une PLL est constituée d'un comparateur de phase, d'un filtre de boucle et d'un oscillateur contrôlé en tension (VCO). Le comparateur de phase fournit une tension ou un courant dont la valeur est proportionnelle à l'écart de phase des signaux présents sur son entrée. Le filtre de boucle permet d'assurer le bon fonctionnement du comparateur de phase en proposant un filtrage de type passe bas. Par ailleurs ce filtre assure la stabilité de la boucle et fixe en grandes parties les performances dynamiques de la PLL. Le VCO est l'actionneur de ce système asservi car c'est grâce à lui que atteint l'objectif essentiel dans une boucle à verrouillage de phase.

Q2 : Lorsque une PLL est verrouillée les fréquences instantanées des signaux à l'entrée du comparateur de phase sont identiques.

Q3 : Lorsque la PLL est verrouillée, la tension de commande V_c du VCO évolue en fonction de la note sifflée sur le micro. Sa valeur est donc une indication de la fréquence et donc de la note jouée. En prélevant cette tension grâce à un convertisseur analogique numérique (ADC) le μC peut ainsi afficher la note correspondante.

Q4 : Caractéristique de transfert du comparateur de phase de type OU-exclusif :



Q5 : Plage de capture : Les valeurs de fréquences où l'on passe du mode non verrouillé au mode verrouillé
Plage de maintien ou de suivi ou de verrouillage : Les valeurs de fréquences où l'on passe du mode verrouillé au mode non verrouillé.

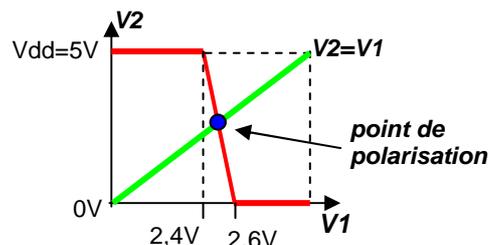
Graphique : **Voir poly de cours**

Pour mesurer ces plages de fonctionnement il suffit d'observer les signaux à l'entrée du comparateur de phase en synchronisant l'oscilloscope sur le signal d'entrée E. En augmentant puis en diminuant lentement la fréquence du signal d'entrée on note les différentes fréquences qui permettent d'accrocher ou non la boucle à verrouillage de phase. Il existe une autre méthode automatique en utilisant un balayage automatique et en observant le signal de commande du VCO (**Voir Poly de cours**)

Q6 : L'association comparateur de phase + filtre de boucle RC passe bas est capable de délivrer une tension de commande évoluant entre 0 et V_{dd} . Dans ces conditions la plage de maintien est alors limitée par la caractéristique du VCO à savoir : 750Hz - 1310Hz

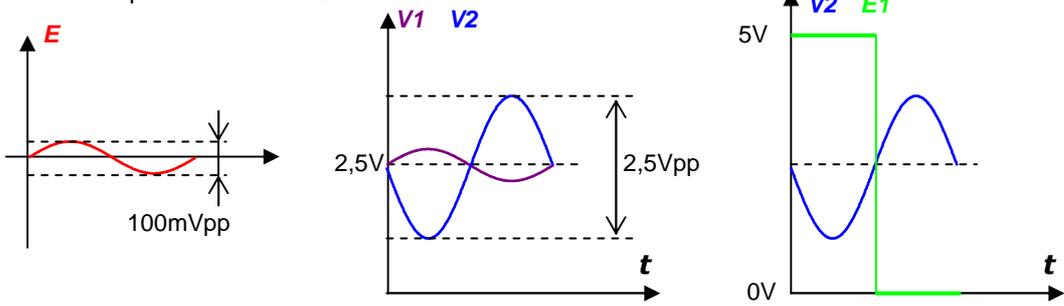
Q7 : Si la PLL est verrouillée, cela signifie que la sortie du VCO délivre la fréquence 990Hz. En reportant cette valeur sur la caractéristique on obtient alors $V_c=2,5V$

En régime continu, la résistance R_p permet de polariser la porte logique autour du point de repos (ou de polarisation) $V_2=V_1=V_{dd}/2$ comme l'indique la figure ci-contre.



Q9 : Le condensateur C_L permet d'appliquer la tension sinusoïdale d'entrée autour de ce point de fonctionnement car il joue le rôle d'un condensateur de liaison. En régime continu il est un circuit ouvert et ne modifie donc pas le point de polarisation. En alternatif et si l'on choisit une valeur suffisamment grande par rapport à la fréquence des signaux il se comporte comme un fil en transmettant ainsi la composante sinusoïdale.

Illustration du fonctionnement du montage permettant de transformer le signal sinusoïdal en un signal carré compatible avec la porte ou-exclusif.



Q9 : Lorsque l'on siffle dans le micro, le signal sur la voie CH1 apparait et la PLL s'accroche comme en témoigne la sortie Lock Detect. En fonction de la note sifflée, la tension de commande du VCO change. En mesurant cette tension il est donc possible d'en déduire la fréquence et donc la note sifflée.

Sur le chronogramme proposé on mesure les tensions de commande 1,3V puis 2,3V et enfin 3,2V.

Dans la partie linéaire du VCO c'est à dire pour Vc compris entre 1V et 4,5V on peut écrire que $F_{vco} = K_{vco} \cdot V_c + F_0$ avec $K_{vco} = 160\text{Hz/V}$ et $F_0 = 590\text{Hz}$

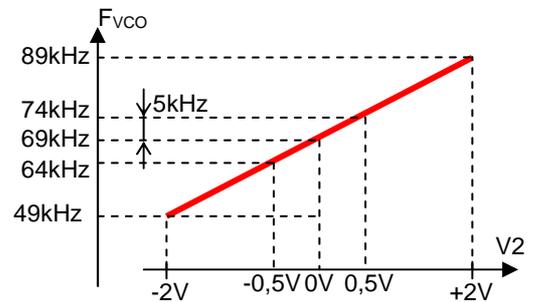
Pour les tensions mesurées on en déduit donc 3 fréquences : 798Hz 958Hz et 1102Hz ce qui nous donne donc les 3 notes SOL Sib et Do#

Problème n°5 : Un récepteur de test pour compteur LINKY

Q1 : Il s'agit d'un comparateur très performant en présence de bruit (indispensable pour l'application proposée) et qui est très simple à mettre en œuvre. Toutefois ce comparateur présente l'inconvénient d'une caractéristique non linéaire (uniquement par morceaux) et son gain de conversion dépend de l'amplitude des signaux sur son entrée.

Q2 : $K_{VCO} = (89-49)\text{kHz}/4\text{V}$ soit $K_{VCO} = 10\text{kHz/V}$

Q3 : Comme la PLL reste verrouillée cela signifie que le VCO délivre la même fréquence que le signal d'entrée. Dans ces conditions il suffit de reporter les fréquences sur la caractéristique du VCO
On obtient donc $V2 = -0,5\text{V}$ pour $f = F_S = 64\text{kHz}$
et $V2 = +0,5\text{V}$ pour $f = F_M = 74\text{kHz}$

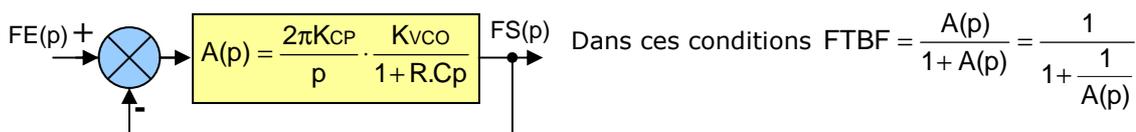


Q4 : Voir poly de cours

Q5 : Lorsque la PLL est verrouillée, on récupère une composante continue en sortie du multiplieur et une composante sinusoïdale de fréquence double de la fréquence d'entrée. Pour obtenir une tension de commande du VCO la plus continue possible il faut donc que $f_c \ll 2 \times 64\text{kHz}$ ce qui est le cas en prenant $f_c = 4,8\text{kHz}$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f_c} \text{ donc } R = 22,1\text{k}\Omega \text{ soit } R = 22\text{k}\Omega \text{ en série normalisée}$$

Q6 : Le schéma bloc peut se mettre sous la forme simplifiée suivante :



$$\text{donc } FTBF = \frac{A(p)}{1 + A(p)} = \frac{1}{1 + \frac{p \cdot (1 + R.Cp)}{2\pi K_{cp} \cdot K_{vco}}} \text{ donc } FTBF = \frac{1}{1 + \frac{p}{2\pi K_{cp} \cdot K_{vco}} + \frac{R.Cp^2}{2\pi K_{cp} \cdot K_{vco}}} \text{ de la forme}$$

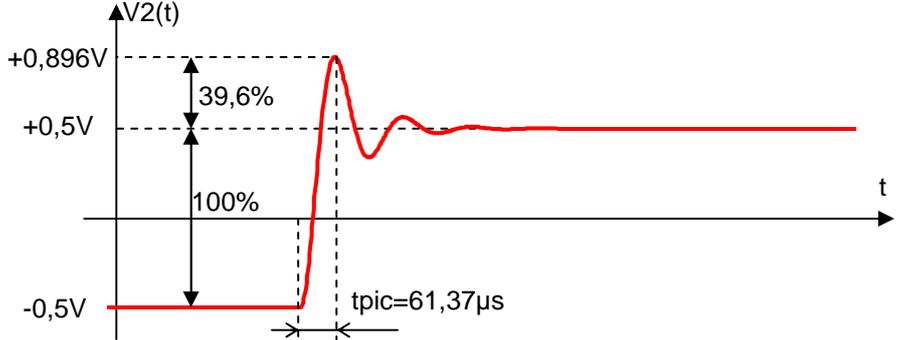
$$FTBF = \frac{1}{1 + 2m \frac{p}{\omega_N} + \left(\frac{p}{\omega_N}\right)^2} \text{ avec } \omega_N = \sqrt{\frac{2\pi K_{CP} K_{VCO}}{RC}} \text{ et } \frac{2m}{\omega_N} = \frac{1}{2\pi K_{CP} K_{VCO}} \text{ soit } m = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{RC \cdot 2\pi K_{CP} K_{VCO}}}$$

Comme $K_{CP} = \frac{K.E_o.S_o}{2}$ donc

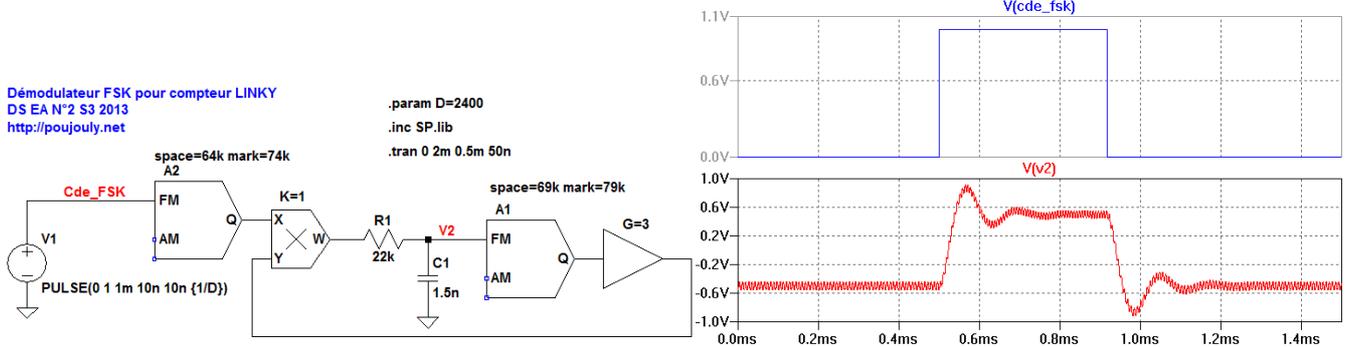
$$K_{CP} = 1,5V / \text{rad} \text{ ce qui donne}$$

$$\omega_N = 53,32 \text{krad/s} \text{ et } m = 0,28$$

Q7 : Valeur du premier dépassement en : $D=39,6\%$ $tpic=61,37\mu s$



En effectuant une simulation LTSpice de la PLL on retrouve un résultat quasi-similaire, à la différence près que l'on constate un résidu de composante en 2FS ou 2FM sur le signal de commande du VCO



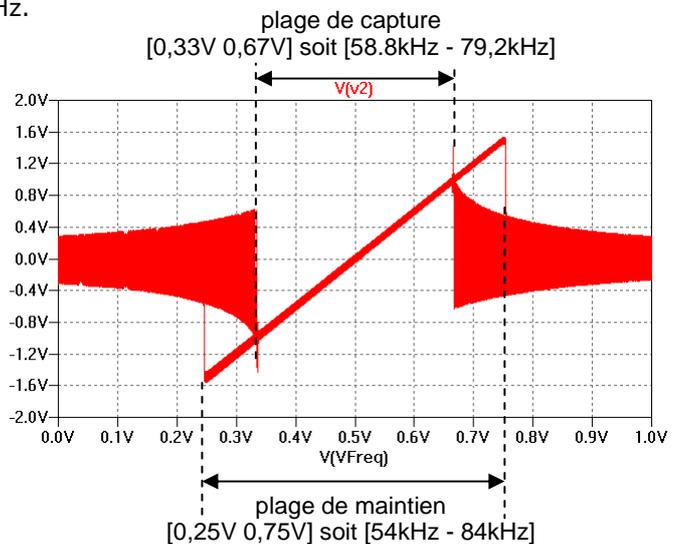
Comme on retrouve sur le signal de commande du VCO l'image des variations de fréquences (+0,5V pour FM=74kHz et -0,5V pour FS=64kHz) un comparateur permet de mettre en forme ce signal pour obtenir un signal numérique compatible TTL (0 / 5V)

Le paramètre Space correspond à la fréquence de sortie du bloc Modulate pour une tension de commande de 0V et le paramètre Mark pour une tension de 1V. Ces 2 paramètres permettent donc de définir complètement la caractéristique du VCO. En reprenant la caractéristique défini pour le VCO on montre que pour 0V la fréquence est de 69kHz et de 79kHz pour une tension de commande de 1V très simplement.

Le générateur V1 avec le bloc modulate A2 permet d'effectuer un balayage très lent sur la fréquence du signal d'entrée. Cela permet ainsi de mettre en évidence l'accrochage de la boucle à verrouillage de phase. Comme on injecte un signal triangulaire qui varie de 0 à 1V, les fréquences appliquées sur l'entrée du comparateur de phase varient donc entre 39kHz et 99kHz.

A partir du relevé obtenu on peut en déduire les plages de fonctionnement de cette PLL en utilisant la correspondance 0-1V 39kHz-99kHz

La plage de maintien peut se justifier aisément car la caractéristique du comparateur de phase ne peut pas fournir une amplitude pour la commande du VCO inférieure à -1,5V et supérieure à 1,5V. En reportant sur la caractéristique du VCO on en déduit une fréquence min de 54kHz et une fréquence max de 84kHz qui correspond exactement aux fréquences mesurées sur la plage de maintien.



Problème n°6 : Etude d'un démodulateur FSK par PLL pour interphone

Analyse du circuit

Q1 : Il s'agit de FM=18,645kHz et FS=22,375kHz. Les termes MARK et SPACE rappelle la configuration du VCO utilisé dans le simulateur LTSpice SPACE pour 0V et MARK pour 1V

Q2 : On constate que Fxtal/FM=192 et Fxtal/FS=160 ce qui laisse à penser l'emploi de simple diviseur de fréquence dont le taux est contrôlé par un signal de commande numérique. Comme à la sortie de ces diviseurs de fréquence le signal est généralement carré, il convient de filtrer pour obtenir un signal sinusoïdal.

Q3 : Comme le circuit est alimenté sous une tension simple il est indispensable de couper la composante continue présente sur la sortie RO sur laquelle le circuit superpose le signal audio.

Comme il s'agit d'un filtre passe haut et que la fréquence basse audio est 300Hz on en déduit une résistance équivalente d'environ $8\Omega \approx \frac{1}{2\pi \times 300\text{Hz} \times 68\mu\text{F}}$ ce qui est classique pour un haut parleur.

Etude de la démodulation FSK

Q4 : En examinant la caractéristique du VCO on peut écrire que $F_{vco} = K_{vco} \cdot V_2 + f_0$ avec K_{vco} : Gain de conversion du VCO $K_{vco} = 4,2\text{kHz/V}$ et $f_0 = 10\text{kHz}$

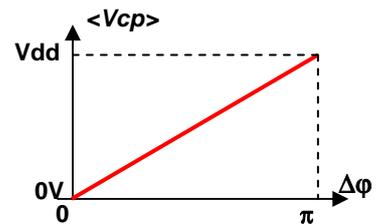
Si l'on suppose que la PLL est verrouillé alors le VCO oscille à la même fréquence que le signal d'entrée donc

pour la fréquence FS on obtient une tension $V_2 = \frac{FS - f_0}{K_{vco}} = \frac{22,375\text{kHz} - 10\text{kHz}}{4,2\text{kHz/V}} \approx 2,95\text{V}$

et pour la fréquence FM on obtient une tension $V_2 = \frac{FM - f_0}{K_{vco}} = \frac{18,645\text{kHz} - 10\text{kHz}}{4,2\text{kHz/V}} \approx 2,06\text{V}$

Q5: Caractéristique de transfert du comparateur de phase Ou exclusif.

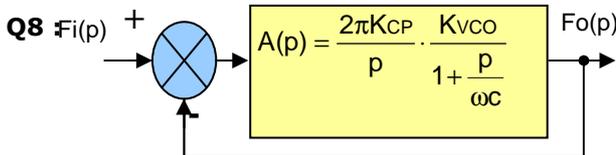
Le gain de conversion $K_{CP} = \frac{V_{dd}}{\pi}$ correspond bien à la pente de la caractéristique.



Q6 : Justification du schéma bloc : voir Poly

$$\omega_C = \frac{1}{R_f \cdot C_f}$$

Q7 : $R_f = \frac{1}{C_f \cdot 2\pi f_c} = \frac{1}{27\text{nF} \times 2\pi \times 950\text{Hz}} = 6,2\text{k}\Omega$



Dans ces conditions FTBF = $\frac{A(p)}{1 + A(p)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A(p)}}$

donc FTBF = $\frac{A(p)}{1 + A(p)} = \frac{1}{p \cdot \left(1 + \frac{p}{\omega_C}\right) + \frac{1}{2\pi K_{CP} \cdot K_{VCO}}}$ donc FTBF = $\frac{1}{1 + \frac{p}{2\pi K_{CP} \cdot K_{VCO}} + \frac{p^2}{2\pi K_{CP} \cdot K_{VCO} \cdot \omega_C}}$ de la forme

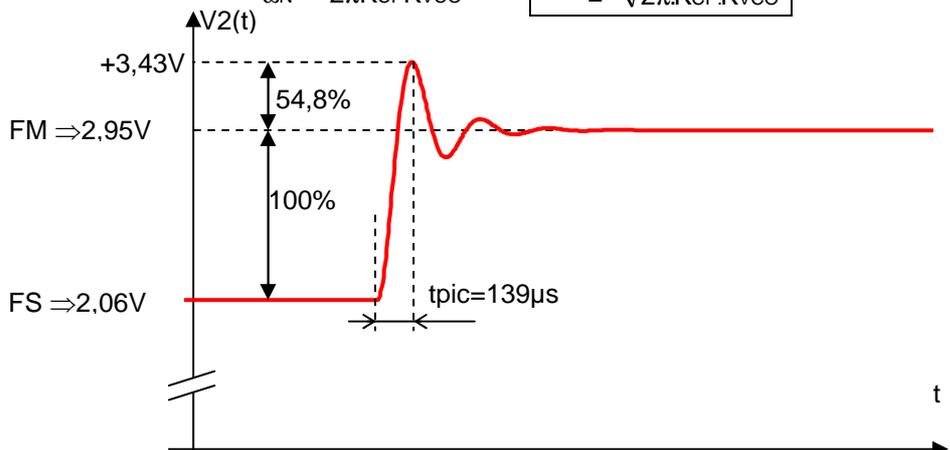
FTBF = $\frac{1}{1 + 2m \frac{p}{\omega_N} + \left(\frac{p}{\omega_N}\right)^2}$ avec $\omega_N = \sqrt{2\pi K_{CP} \cdot K_{VCO} \cdot \omega_C}$ et $\frac{2m}{\omega_N} = \frac{1}{2\pi K_{CP} \cdot K_{VCO}}$ soit $m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{\omega_C}}{\sqrt{2\pi \cdot K_{CP} \cdot K_{VCO}}}$

$K_{vco} = 4,2\text{kHz/V}$ $K_{CP} = \frac{5}{\pi}$

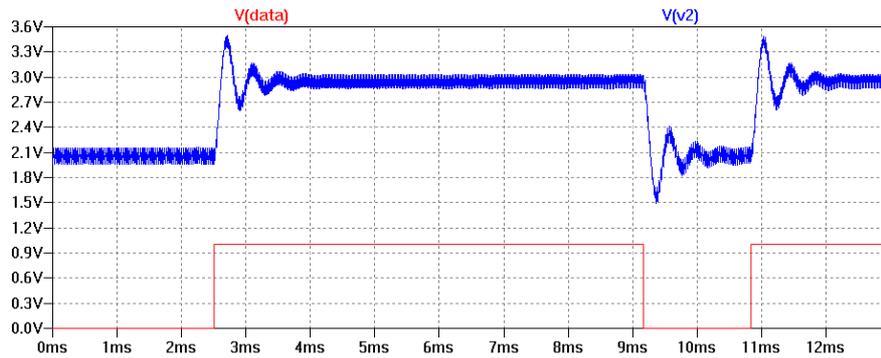
$\omega_C = 2\pi f_c = 2\pi \cdot 950 \text{ rad/s}$

donc $m = 0,188$ et $\omega_N = 15,83\text{krad/s}$

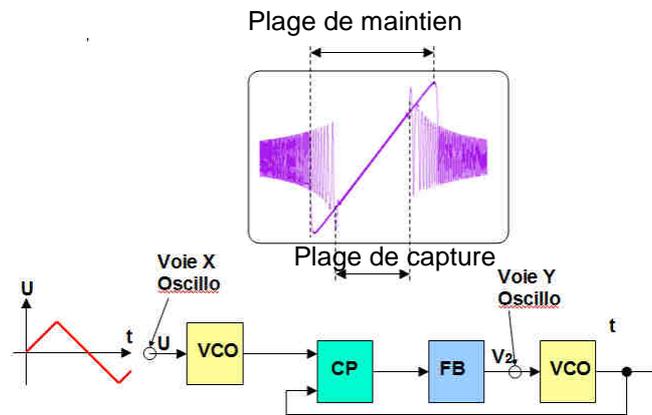
Q9 : D%=54,8% et tpic=202μs



Q10 : Le comparateur de tension présent sur la tension V2 permet de mettre en forme l'information numérique car comme le filtre n'est pas idéal il reste de l'ondulation sur le signal de commande du VCO comme le montre le résultat de simulation suivant :



Q11 : La plage de maintien correspond ici à la plage du VCO c'est à dire 10kHz - 31kHz. L'autre plage que l'on rencontre est la plage de capture. Voir TP & poly pour la description de la méthode expérimentale :



Problème n°9 : Un émetteur pour localisation de fuites d'eau

Q1 : Antenne quart d'onde ou ground plane de longueur $L=17\text{cm}$ approximativement $\left(L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4.f}\right)$

Q2 : La PLL est utilisée en synthèse de fréquence donc $433,6\text{MHz}/3,3875\text{MHz} = 128$ correspond à la valeur du Prescaler donc MOD_CTRL= « high » et DIV_CTRL= « low »

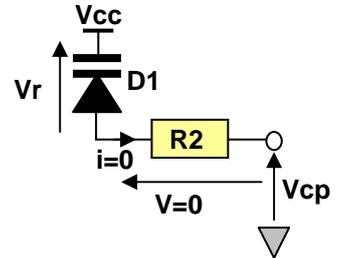
Q3 : Un VCO seul à base d'élément LC ne permet pas d'obtenir la précision et la stabilité nécessaire. Modulation sur l'entrée du VCO en choisissant un filtre de boucle suffisamment « lent » pour assurer la correction de dérive sur la valeur de la fréquence porteuse.

Q4 : La diode D2 est une diode Varicap qui permet de faire varier très légèrement la fréquence de l'oscillateur à quartz lorsque l'on applique un signal positif sur l'entrée de modulation Vmod.

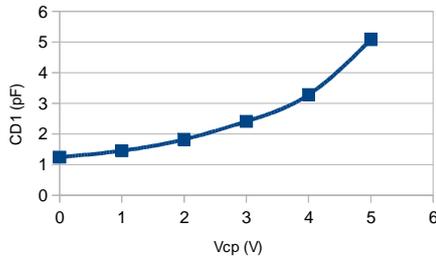
Q5 : Charge pump : voir Poly. Filtre de boucle C2 // R1 en série avec C1.

Q6 : Le filtre doit permettre à la boucle d'être suffisamment rapide pour avoir une bande passante de 10kHz.

Q7 : La résistance R2 permet de polariser la diode varicap D1 en inverse. En continu une inductance se comporte comme un circuit fermé. $V_r = V_{cc} - V_{cp}$ donc comme $V_{cp} < V_{cc}$ alors $V_r > 0$ ce qui permet d'avoir une diode varicap D1 polarisée en inverse.



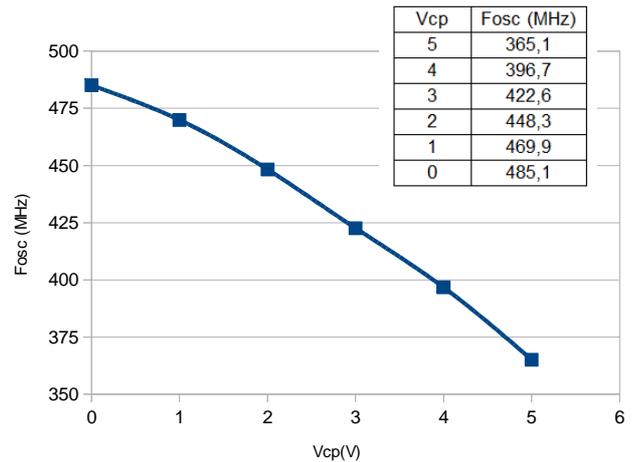
Q8 :



$$Q9 : f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}}$$

avec $C_{eq} = C_{po} + \frac{C_o \cdot CD1}{C_o + CD1}$ et $L_{eq} = L1 + L2 = 54\text{nH}$

Q10 :



Problème n°10 : Analyse d'un récepteur FM intégré

Q1 : La valeur de la fréquence intermédiaire est de 225kHz. Cette valeur très basse peut poser des problèmes dans une solution classique pour permettre de supprimer la fréquence image surtout que celle ci fait forcément partie de la bande de réception. La solution avec le réjecteur de fréquence image intégré est donc indispensable.

Q2 : Comme la fréquence intermédiaire est très basse les valeurs de fréquence possibles pour l'oscillateur local correspondent quasiment aux fréquences de réception radio soit $76\text{MHz} \pm 225\text{kHz}$ à $108\text{MHz} \pm 225\text{kHz}$. Comme il y a un diviseur de fréquence par 2 entre l'OL et le VCO on en déduit donc une plage de variation de $152\text{MHz} \pm 450\text{kHz}$ à $216\text{MHz} \pm 450\text{kHz}$ ce qui correspond bien aux indications fournies "The VCO frequency range is 150 MHz to 217 MHz"

Q3 : On utilise un quartz de 13MHz et l'on programme les éléments suivants : data byte 4 bit 4 = 1 bit 3 = 0. donc le diviseur de référence est de 260 ce qui donne une fréquence du comparateur de phase de $13\text{MHz}/260 = 50\text{kHz}$.

Comme la fréquence de réception est de 96MHz cela signifie que la fréquence de l'oscillateur LOCAL est de $96\text{MHz} \pm 225\text{kHz}$ soit une fréquence du VCO de $192\text{MHz} \pm 450\text{kHz}$ soit une valeur $N_{prog}=3849$ ou $N_{prog}=3831$

Q4 : Les composants qui interviennent dans la réalisation du VCO sont les 2 diodes varicap D1 & D2 ainsi que les inductances L2 & L3. La résistance de 220kΩ permet de polariser les 2 diodes varicap en inverse et sa valeur est suffisamment importante pour être oublié en alternatif.

Les 2 inductances se retrouvent en série et les 2 condensateurs aussi donc

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \text{ avec } L_{eq} = L2 + L3 \text{ et } C_{eq} = \frac{CD1 \cdot CD2}{CD1 + CD2}$$

Q5 : Voir Poly de cours

Q6 : R1=100kΩ C1=100nF et C0=22nF

Q7 : Par identification on retrouve $\omega_1 = \frac{1}{R1 \cdot C1}$ $\omega_2 = \frac{C0 + C1}{R1 \cdot C1 \cdot C0} = \omega_1 \cdot \left(1 + \frac{C1}{C0}\right)$ et $\omega_3 = \sqrt{\frac{2\pi K_{cp} K_{vco}}{N_{prog}(C0 + C1)}}$

donc $\omega_1 = 100 \text{ rad/s}$ $\omega_2 = 554,545 \text{ rad/s}$

Q8 : $M_{\varphi} = 0,767 \text{ rad}$ soit $M_{\varphi} \approx 44^\circ$

Q9 : $t_{rep} = \frac{1}{f_t} = \frac{2\pi}{\omega_T} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_1 \omega_2}} = 26,7 \text{ ms}$ ce qui est une valeur relativement faible

Mais pour parcourir les différentes stations radio par pas de 50kHz. et pour couvrir la bande 88MHz - 108MHz il faut donc un temps de 10,7s !!

$$\omega_3^2 = \omega_1 \omega_2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} = \omega_T^2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}}$$

Q10 : Comme $\omega_3^2 = \omega_1 \omega_2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} = \frac{2\pi K_{cp} K_{vco}}{N_{prog}(C0 + C1)}$ alors $K_{vco} = N_{prog}(C0 + C1) \cdot \frac{\omega_1 \omega_2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}}}{2\pi K_{cp}}$ soit

$K_{vco} = 21,26 \text{ MHz/V}$

Cette valeur semble cohérente car pour la plage à parcourir 150MHz / 217MHz cela nécessite une tension d'environ 3,15V ce qui est conforme avec la tension de 3,3V donnée dans la question.

Comme $f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L \cdot \frac{CD}{2}}}$ alors $CD = \frac{1}{L \cdot (2\pi f_{osc})^2}$ avec L=100nH

pour $f_{osc} = 150 \text{ MHz}$ $CD = 11,26 \text{ pF}$ et $f_{osc} = 217 \text{ MHz}$ $CD = 5,38 \text{ pF}$ ce qui représente des valeurs conforme pour des diodes varicap.