

MP23 Mise en forme transport et détection de l'information

Dihya Sadi

Session 2021

1 Introduction

Comment transmettre efficacement l'information ? Par exemple pour transmettre une onde sonore ? [20 Hz-20 kHz] mais on a une atténuation géométrique en $\frac{1}{r^2}$, qui est en plus facilement bruité si on a plusieurs informations à transmettre. L'idée serait alors de transformer cette onde sonore en onde EM. Mais alors pour des OEM de fréquence de l'ordre de celle des ondes sonores il faudrait des antennes énormes ($10^7 m$). On préfère donc transporter des ondes de l'ordre du MHz par exemple. Pour cela on utilise ce qui s'appelle la modulation : le signal que l'on veut transmettre est un signal à très haute fréquence, et l'information à basse fréquence que l'on veut transmettre est encodée dans une des caractéristiques de ce signal haute fréquence (amplitude, fréquence, ou phase). On appelle **porteuse** le signal haute fréquence, et **modulante** l'information basse fréquence à transmettre.

Le domaine de la modulation des signaux vient du besoin de transmettre un signal physique, support d'une information, entre deux points distants. Considérons un signal à transmettre $s(t)$, ayant une représentation fréquentielle $S(f)$. Le spectre du signal, calculé par la transformée de Fourier, est en particulier caractérisé par l'encombrement fréquentiel, c'est-à-dire la zone de fréquence que le signal occupe, zone appelée *largeur de bande spectrale*. Pour tout signal réel $s(t)$, on a un spectre borné pour lequel on peut définir une fréquence minimale f_m et une fréquence maximale f_M telles que $S(f) = 0$ pour toute fréquence f inférieure à f_m et supérieure à f_M (figure 5.1, page suivante). Par exemple nous avons :

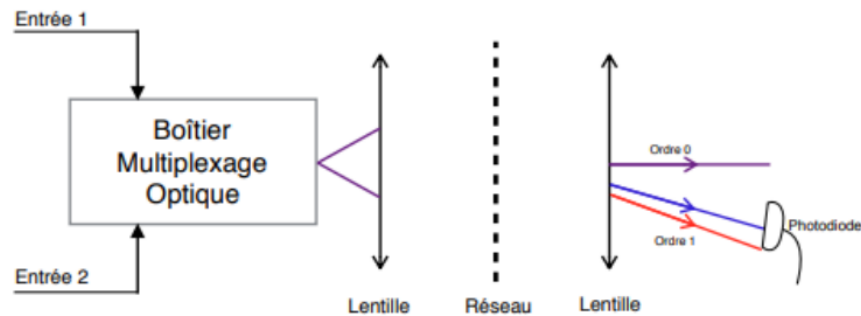
- signal de parole « téléphonie » : $f_m = 300$ Hz et $f_M = 3,4$ kHz
- signal sonore « haute fidélité » : $f_m = 20$ Hz et $f_M = 16$ kHz

La transmission de ce signal va être effectuée soit à l'aide d'un support physique de transmission qui peut être un câble métallique (paire bifilaire, câble coaxial) ou une fibre optique, soit en utilisant une propagation libre d'ondes hertziennes.

De la même façon que pour le signal, une voie de transmission est nécessairement imparfaite et donc ne laisse passer que certaines fréquences. Cette bande de fréquences, dans laquelle les signaux sont « correctement » transmis, caractérise le support de transmission ; elle est appelée *bande passante du support*. Cette bande

2 Multiplexage et démultiplexage optique

Imaginons que l'on ait plusieurs conversations téléphoniques en même temps et qu'il faille donc transporter plusieurs informations. Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations à travers un seul support de transmission. On va l'illustrer ici de manière optique mais c'est aussi ce que l'on fait électroniquement. Premier type de modulation : modulation en amplitude. On multiplie simplement les deux signaux, basse et haute fréquence.



Matériel

- 4 câbles coax
- 2 câbles bananes
- 3 câbles secteurs
- 2 alims +15/-15 : une pour le boîtier de multiplexage, une pour la photodiode
- 1 amplificateur
- 1 haut parleur
- 1 réseau cbien de fentes ?
- 2 lentilles 200mm
- 1 boy pour surelever le boîtier de multiplexage
- Le boîtier de multiplexage
- 1 photodiode

Protocole

- Tout d'abord principe de la modulation en amplitude : on multiplie le signal audible qui nous intéresse par un signal optique donc à une fréquence très élevée.

- On a deux signaux qui nous intéressent, deux notes, dans l'audible, l'une à 440Hz l'autre à 620 Hz. On veut les transporter TOUTES LES DEUX. On les module en amplitude par des signaux lumineux à des fréquences optiques donc très élevées, l'une bleue l'une rouge (THz).
- On s'assure d'être dans le plage de fonctionnement linéaire de la LED en réglant l'offset : on éteint par exemple complètement la LED bleue puis on règle la LED rouge en se plaçant dans la zone "linéaire", appréciation à l'oeil. Puis idem pour la LED bleue.
- Dans le boîtier, un multiplexage est réalisé : le signal lumineux des deux diodes est mélangé par simple synthèse additive des couleurs. On a ainsi comme fréquences de porteuse les fréquences optiques (Rouge et bleue) et la fréquence modulante est celle délivrée par le GBF. Il s'agit de la mise en forme.
- Transport : faisceaux + lentilles du faisceau violet. Un seul support de transmission.
- Le signal sort ensuite de la plaquette. On réalise un faisceau parallèle par autocollimation avec une des lentille puis on refocalise sur une photodiode avec l'autre. On intercale sur le trajet du faisceau parallèle un réseau qui va effectuer le démultiplexage en séparant à nouveau les longueurs d'ondes : le rouge est plus dévié que le bleu.
- Détection de l'information : photodiode + ampli + haut parleur.

Cette première manipulation qualitative nous a permis d'introduire de nombreux concepts intéressants : modulation en amplitude, multiplexage et démultiplexage, détection. Toutefois on utilise plutôt la modulation en fréquence. C'est le principe de la radio.

3 Modulation et démodulation en fréquence (radio)

3.1 Modulation en fréquence

Matériel

- GBF 2 voies
- Oscilloscope
- Igor

On va maintenant étudier plus en détail une autre méthode de transport de l'information : la modulation de fréquence. Le principe est le suivant (réalisé pour nous à l'intérieur

du GBF). On dispose d'un signal sinusoïdal basse fréquence $m(t)$ qui nous intéresse. On va l'encoder dans un autre signal sinusoïdal haute fréquence de sorte que :

$$u(t) = U_0 \cos(2\pi(f_p + \beta m(t))t)$$

Soit :

$$u(t) = U_0 \cos(2\pi f_p t + \beta \sin(2\pi f_m t))$$

Où on a :

- f_p fréquence de la porteuse
- f_m fréquence de la modulante (signal qui nous intéresse)
- $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$ avec Δf déviation en fréquence

Une des caractéristiques les plus importantes d'un tel signal est son encombrement spectral : c'est ce qui va conditionner 1) le mode de transport 2) possibilité de multiplexage.

On caractérise cela par ce qu'on appelle la **Bande de Carson** qui correspond à la **largeur de canal fréquentiel où 98 pourcents de la puissance est comprise.**

Pour un indice de déviation $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$ suffisamment grand on a (formule empirique):

$$B = 2(\Delta f + f_m)$$

Protocole

- On choisit une fréquence de porteuse de 30 kHz et une fréquence de modulation de 100 Hz, ainsi qu'une amplitude de 3VPP
- On va faire varier la déviation en fréquence entre 100 et 2000 Hz.
- On réalise la FFT sur Igor. Les pics observés sont séparés de f_m . On place les curseurs entre des paires de pics, on clique sur power ratio, et ce jusqu'à avoir 98 pourcents de la puissance entre les deux curseurs. L'écart fréquentiel est alors la bande de Carson.
- On trace $B = f(\Delta f)$
- En live : modulante à 1Hz et déviation à 1kHz pour voir en temporel la modulation de fréquence. Bien expliquer ! Montrer l'allure de son spectre, et bien l'expliquer en disant que les hauteurs des pics sont coeffs de Bessel, dépendant du rapport β
- Ensuite on revient aux paramètres de tout à l'heure, on affiche le spectre etc et on ajoute un point en direct.

Rq : plutôt que utiliser la macro Igor, on peut afficher le spectre en FFT, mesurer le niveau en dB de chaque pic. De la hauteur en dB on déduit la puissance totale $P_{tot} = \sum (10^{\frac{dB}{20}})^2$ puis calculer la valeur de 98 pourcent de cette puissance puis la fréquence du pic à partir duquel cette valeur a été dépassée.

On a caractérisé l'encombrement spectral du signal, on connaît la plage fréquentielle qu'il occupe. On va maintenant démoduler en fréquence pour extraire l'information. La grande majorité des démodulateurs de signaux analogiques ou numériques fonctionnent suivant le principe de démodulation cohérente. Il s'agit de multiplier le signal modulé reçu par un signal qui présente les mêmes caractéristiques (fréquence et phase) que l'onde porteuse. Quelques équations simples montrent alors que l'information est extraite après un filtrage de type passe-bas. On suppose donc disposer d'un oscillateur local calé en phase et en fréquence avec le signal porteur. Dans la réalité, ce signal n'est en général pas contenu dans le spectre du signal reçu. Et il est difficile de récupérer EXACTEMENT la fréquence de la porteuse. Or dans cette méthode même un faible écart casserait tout. On doit donc recourir à l'élaboration de systèmes analogiques particuliers pour récupérer cette information indispensable à l'application du principe de démodulation cohérente. Ce problème de récupération de la porteuse est un gros enjeu. La boucle à verrouillage de phase qu'on va présenter permet de s'affranchir de ce problème, on va voir comment. (1932)

3.2 Démodulation en fréquence : la boucle à verrouillage de phase

Matériel

- 2 GBF 2 voies qui peuvent faire de la modulation en externe ou interne
- 1 oscilloscope
- 1 plaquette carte mère + multiplieur + sommateur + de quoi faire un filtrage passe bas + plaquette décades condensateurs et résistances (100nF et 1k) (en fonction du multiplieur que l'on prends attention à la mise à la masse...)
- Amplificateur de courant/tension
- OCT Thandar 4
- 2 câbles jack-coax
- 1 alim +15/-15 pour la plaquette
- Tés et coax à foison

Pb de récupération de la porteuse est pas forcément évident, là c'est fait avec la PLL :

Principe général : la boucle à verrouillage de phase est constituée d'un oscillateur commandé en tension intégré dans une boucle d'asservissement qui permet d'accrocher la fréquence de l'oscillateur sur une fréquence du signal d'entrée.

On va étudier un à un les constituants de la boucle :

Comparateur de phase

Il est simplement réalisé par un multiplieur puis un filtre passe-bas. On envoie en entrée deux sinusoïdes de fréquences différentes, et on récupère en sortie un signal proportionnel à $\cos(\phi_1 - \phi_2)$. Le coefficient directeur est $K = k_{cp} \frac{U_1 U_2}{2}$ où k_{cp} dépend du gain du filtre passe-bas que l'on a fabriqué.

En préparation:

On peut vérifier le comportement du comparateur de phase et déterminer son gain comme suit :

- On envoie deux sinusoïdes de fréquence 100 kHz et amplitude 3 Vpp. Pour chacune des deux voies on met la phase à 0 et on appuie sur sync internal.
- Ensuite on construit le passe bas de sorte à avoir une fréquence de coupure autour de 10 kHz.
- On observe à l'oscilloscope la tension de sortie, qu'on trace en fonction du déphasage entre les deux voies.

Oscillateur commandé en tension (VCO)

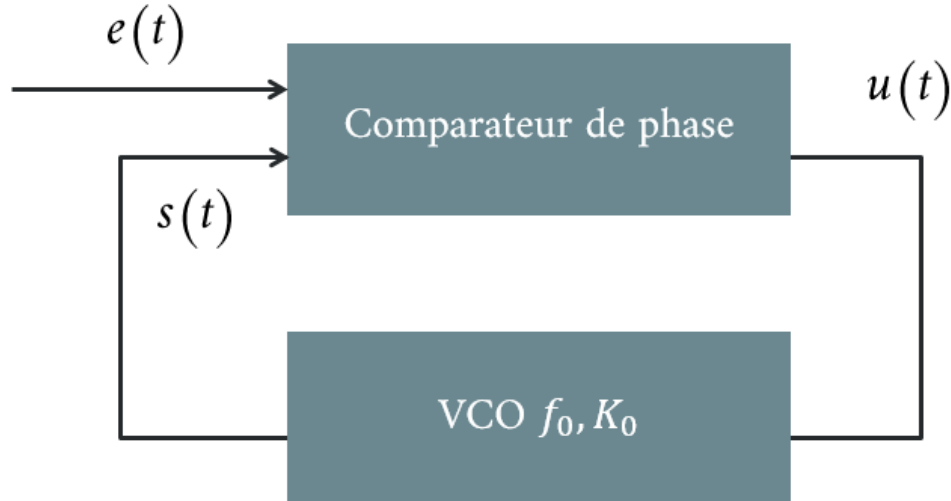
Le principe est le suivant : le VCO est centré sur une fréquence f_0 (que l'on contrôle avec les boutons). Alors pour un signal d'entrée $u(t)$ le signal renvoyé en sortie est un signal v_s sinusoïdal de fréquence $f_s(t) = f_0 + K_0 u(t)$.

En préparation

- On choisit la fréquence centrale à 100 kHz en réglant la gamme 100k
- On envoie en entrée une tension continue de -0,5V à 0,5V et on place le coax sur sweep in
- On regarde le signal de sortie de la voie 50 Ohm OUT à l'oscilloscope.
- On trace la fréquence de signal de sortie en fonction de l'amplitude du signal d'entrée, on en déduit la pente du VCO

Boucle à verrouillage de phase

Pour résumer :



Le signal d'entrée est :

$$e(t) = A \cos(2\pi(f_p + k_p m(t))t) = A \cos(2\pi f_e(t)t)$$

Le signal de sortie qui revient sur le comparateur de phase est le signal de sortie du VCO soit :

$$s(t) = B \cos(2\pi(f_0 + K_0 u(t))t) = B \cos(2\pi f_s(t)t)$$

On peut montrer (cf modélisation linéaire de la PLL à la fin du document) qu'une fois le régime permanent atteint $f_s(t) = f_e(t)$ d'où :

$$u(t) = \frac{f_p - f_0}{K_0} + \frac{k_p}{K_0} m(t)$$

En récupérant ainsi le signal en sortie du comparateur de phase on a une image du signal $m(t)$ modulé !

Plages de fonctionnement de la PLL :

- On envoie une sinusoïde random en entrée du multiplieur de fréquence variable autour de 100kHz.
- Plage d'accrochage/capture
Il s'agit de la plage en fréquence pour laquelle la boucle est bien asservie. Elle ne dépend que de la bande passante du filtre passe-bas du comparateur. Il faut simplement que la différence $f_e - f_0$ rentre dans la bande passante. Sinon $u=0$ et donc $f_s = f_0$. Cette plage vaut donc théoriquement $[f_0 - F_c; f_0 + F_c]$

- Plage de verrouillage

Il s'agit de la plage de fréquence sur laquelle la boucle reste accrochée une fois qu'on a réussi à l'accrocher.

Si on considère que l'élément limitant est le VCO alors cette plage est $[F_{min}, F_{max}]$ (imposés par le VCO). Si on considère que l'élément limité est la non linéarité de la caractéristique du comparateur alors la plage de verrouillage est $[f_0 \pm K_0 U_{max}]$ où $U_{max} = \frac{k_{cp} U_1 U_2}{2}$. Il faut que la bande de Carson soit comprise dans cette plage de verrouillage.

Pour modifier la plage de verrouillage on peut jouer sur les caractéristiques du VCO ($f_0, K_0, F_{min}, F_{max}$), ainsi que sur U_{max} qui varie en fonction de l'amplitude du signal d'entrée. C'est intéressant car on peut alors l'adapter au signal que l'on cherche à démoduler !

3.2.1 Mise en oeuvre, manips, exploitation

- On va chercher à simuler le fonctionnement d'un poste radio. Pour cela on fabrique deux signaux modulés en fréquence à des porteuses différentes. On envoie dans deux GBF deux voies des chansons via l'entrée type Coax "Modulate In" qui est à l'arrière des GBF, et on les module en fréquence l'un à 100 kHz l'autre à 300kHz avec modulation en source externe, avec une déviation de l'ordre de 50kHz. (**Multiplexage + transport**)
- On somme les deux signaux sur une plaquette de sommation
- On récupère la sortie qu'on envoie dans la PLL.
- Ensuite on récupère le $u(t)$ (entrée du VCO, sortie du filtre RC) à un amplificateur de courant puis un haut parleur
- On montre que si on place la fréquence du VCO autour de 100kHz on retrouve la chanson qu'on a modulé à cette fréquence et si on le place autour de 300 kHz on retrouve l'autre!
- Rôle de la séparation des canaux : si on rapproche une des deux porteuses alors que l'on est en train de démoduler l'autre, le signal de sortie est très bruité.

On a discuté la mise en forme, le transport et la détection de signaux analogiques. Qu'en est-il pour les signaux numériques ?

4 Transmission et détection numérique sur fibre optique plastique

Matériel

- GBF 2 voies
- Alim +15/-15
- Plaquette "fibre optique"
- Oscillo

On simule l'envoi de données numériques sous forme de bits dans une fibre optique (porteuse optique donc), et on va étudier les limitations du dispositif de détection.

Protocole On utilise une LED alimentée par un GBF, l'information transmise à travers une fibre optique, on récupère l'info avec une photodiode dans un circuit électronique de détection, puis oscilloscope. Montrer la lumière dans la fibre à ce moment là !

Deux montages possibles :

- **Montage simple : résistance de mesure**

Signal analogique

On envoie avec le GBF un sinus d'amplitude 4Vpp et un offset de 8V, de sorte à avoir en entrée 6V/10V. On utilise une résistance de protection de 560 Ohms. De sorte à être dans la bonne zone de linéarité de la LED (entre 0 et 40 mA) On introduit la fibre optique dans la LED, on montre au jury la lumière de la LED en sortie. On relie l'émission et la réception par une fibre optique en plastique. On fait varier la fréquence, le système de détection a un comportement type basse pass. (Pourquoi ? Equivalent d'un circuit RC avec C la capacité de jonction de la photodiode). On peut tracer le spectre en direct avec le mode SWEEP ! Ce caractère passe-bas va limiter le débit maximum de transmission de bits sur porteuse optique. Ce qu'on va vérifier tout de suite

Signal numérique : simulé avec le GBF

On génère avec le mode PRBS de l'oscilloscope un signal qui simule une suite aléatoire de 0 et de 1. On trigge sur l'oscillo en mode externe.

On visualise le temps de réponse du récepteur qui nous donne le débit maximal d'information qu'on peut obtenir. Ce temps de réponse peut donc influencer sur le débit maximal d'informations qu'on peut transmettre.

On augmente le débit sur le GBF: au bout d'un moment le temps de réponse est trop grand pour qu'on puisse récupérer l'info, on en déduit le débit maximal. On mets un curseur à 50 pourcents de l'amplitude des crêteaux et lorsque la tension de sortie de la PD ne dépasse plus ce seuil on a est à la limite.

On modifie la résistance de polarisation de la photodiode (de 10 kOhms à 1kOhm) et on voit que ça améliore le débit, ce qui est logique car le temps de réponse est RC donc il diminue si on diminue R. Mais ça atténue le signal qu'on récupère

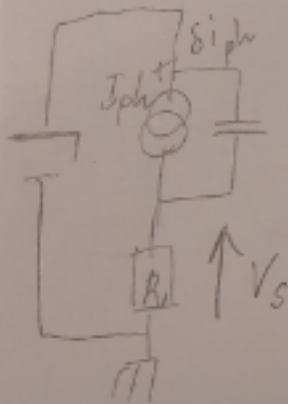
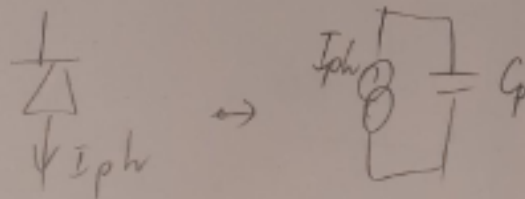
- **Montage suiveur**

Réponse du système améliorée. Pourquoi ? Le suiveur recopie simplement la tension sans prélever aucun courant. On s'affranchit donc de la capacité du câble

en parallèle de la capacité de jonction de la photodiode, qui était tout à l'heure compris dans le temps de réponse. Puisqu'ici le câble de mesure est placé après le suiveur. On diminue ainsi notablement le temps de réponse et donc on augmente le débit max.

Modèle possible de la PD:

Source de courant + capacité de jonction



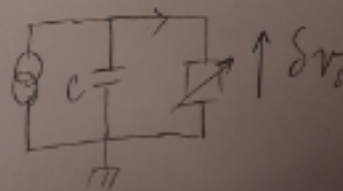
On décompose en 2pb : alternatif + continu
partie cste + 1 partie variable

$$V_s + \delta V_s$$

- $\delta I_{ph} = 0$

$$V_s = R_f I_{ph}$$

- $I_{ph} = 0 \quad E = 0$

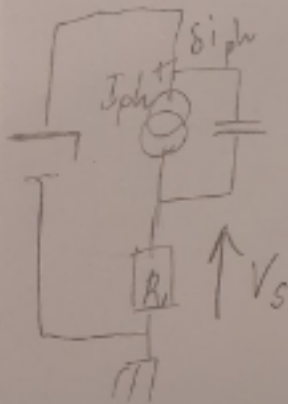
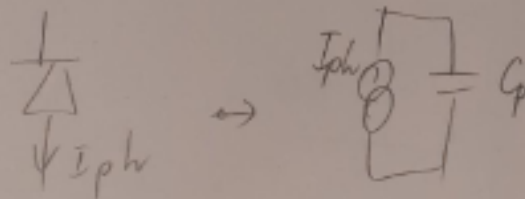


$$\delta V_s = Z \delta I_{ph}$$

↳ 1^{er} ordre ! BP: $\frac{1}{2\pi R_f C_j}$

Modèle possible de la PD:

Source de courant + capacité de jonction



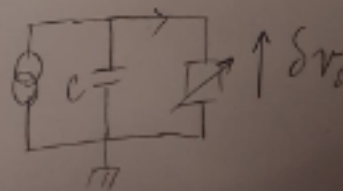
On décompose en 2pb : alternatif + continu
partie cste + 1 partie variable

$$V_s + \delta V_s$$

- $\delta I_{ph} = 0$

$$V_s = R_f I_{ph}$$

- $I_{ph} = 0 \quad E = 0$



$$\delta V_s = Z \delta I_{ph}$$

↳ 1^{er} ordre ! BP: $\frac{1}{2\pi R_f C_f}$

5 Questions et commentaires de Fabienne

- Q. d'optique : faire l'image de la LED avec une lentille de 200mm avec un facteur 3 de grandissement
- Pourquoi le débit max varie en fonction de la résistance de photodiode ? Parce que ça change le temps de réponse qui vaut RC , C étant la capacité de la photodiode + autres capacités parasites type câbles etc
- Quand on met un suiveur : on se débarrasse de la capacité parasite des câbles donc on diminue la résistance, le suiveur recopie la tension du capteur en prélevant un courant infime et transmet cette tension avec la possibilité de fournir le courant demandé par le circuit suivant, fait une adaptation d'impédance.
- En quoi prendre un maximum de période permet d'avoir un meilleur spectre ? Nombre de points fixé par l'oscillo mais on modifie la fréquence d'échantillonnage
- En quoi la bande de Carson est un outil intéressant ? Si on veut faire du multiplexage électronique
- Petite étape pour passer d'un signal audible à un signal électronique qu'il faut qd même mentionner
- Point résolution de la FFT
Si on lui donne N points il nous donne N points ni plus ni moins, et N est fixé par l'oscillo.
On donne N points entre 0 et T , avec T_E écart entre deux points
Le fait que ce soit échantillonné veut dire que le spectre est périodique de période F_e . Il ne nous l'affiche de toute manière seulement entre 0 et F_E .
Résolution spectrale est donc $\frac{F_E}{N} = \frac{1}{T}$ donc résolution directement liée à la largeur en temps sur laquelle on affiche !
- Pourquoi utiliser des fréquences de porteuses hautes ? Sinon on a un problème de taille pour les antennes.
- Pour le multiplexage/demultiplexage optique : qu'est ce qui joue le rôle du démultiplexage ? Le réseau. Comment choisir son pas ? Grand pour bien séparer le bleu du rouge. Limite de résolution ? La taille du capteur (oeil ou bien photodiode)
- PLL : choix de la fréquence de coupure du comparateur ? Petite (1 décade) devant la fréquence centrale du VCO mais pas trop sinon la plage d'accrochage est trop petite
- Importances des plages de capture et de verrouillage ?

- A quoi sert de mesurer la bande de Carson ? Estimer l'encombrement spectral associé à un signal modulé en fréquence. On peut alors dimensionner notre multiplexage pour que l'intégrité des signaux multiplexés reste préservée (pas de chevauchement des bandes de Carson).