

Maxime MARTINEZ et Elise CAMUS  
26/01/18

« En dépit des perfectionnements électroniques, il advient parfois que la bonne vieille feuille imprimée soit le moyen d'information le plus pratique. »

Arthur C. CLARKE, auteur de l'Odyssée de l'Espace

### Commentaires du jury :

**Depuis 2010** : Ce montage ne se restreint pas à la modulation d'amplitude. Il semble important d'aborder le cas des signaux numériques modernes. Dans le cas de la démodulation synchrone, le problème de la récupération de la porteuse est systématiquement passé sous silence. Comme l'indique son titre, ce montage comporte trois parties d'égale importance ; il se prête bien à la réalisation d'une chaîne complète traitant des trois aspects. Il est souhaitable de connaître les différentes solutions technologiques employées dans les applications de la vie quotidienne. Ce montage suppose une connaissance argumentée des choix en radio AM, radio FM, téléphonie mobile... Il convient aussi de se demander comment passer de l'étude élémentaire d'un signal informatif purement sinusoïdal au cas d'une ou plusieurs conversations téléphoniques par exemple. Rappelons enfin l'importance des fibres optiques en télécommunications.

Jusqu'en 2008, le titre était : *Télécommunication : mise en forme, transmission et détection de l'information.*

**1999** : Plusieurs candidats ont confondu filtrage et démodulation d'amplitude. Les deux fonctions ont des points communs mais présentent des différences. En effet, le filtrage correspond à des phénomènes linéaires [...] ; il est entendu que le rapport sortie/entrée varie avec la fréquence. Au contraire, la démodulation n'est pas un phénomène linéaire : la porteuse et le signal sont le plus souvent multipliés et la démodulation nécessite une diode de détection qui est un composant non-linéaire ; c'est une opération plus complexe que le filtrage.

### Bibliographie :

- |   |  |   |
|---|--|---|
|  | Duffait, <i>Expériences d'électronique à l'agrégation</i>    | → LA référence de base, à lire et relire  |
|   | Quaranta IV (électricité), « <i>lignes de transmission</i> » | → pour le câble coaxial   |
|   | Manneville, <i>Electronique</i> , Tome II                    | → Plus théorique, déconseillé en 1 <sup>ère</sup> lecture, mais TB après le Duffait |

### Plan du montage :

- I. Etude d'un moyen de transmission de l'information : le câble coaxial
  - a. Mesure de la célérité des ondes à l'intérieur du câble
  - b. Mesure de l'impédance caractéristique
  - c. Mesure de la fréquence de coupure
  
- II. Une première méthode de mise en forme/ détection : la modulation AM
  - a. Modulation par un multiplieur
  - b. Démodulation synchrone
  
- III. Une seconde méthode de mise en forme / détection : la modulation FM
  - a. Modulation par un OCT
  - b. Démodulation par PLL

### Introduction :

Le transfert d'informations au XXI<sup>e</sup> siècle passe par l'utilisation de divers supports (radio, TV, internet, téléphonies fixes et mobiles...) et doit pouvoir s'effectuer rapidement d'un bout à l'autre de la Terre. Pour cela, différentes technologies de mise en forme, de transport et de détection de l'information ont été développées.

#### I. CABLE COAXIAL

Développé aux alentours des années 1900 par Heaviside, physicien télégraphiste. Avantage : peu sensible aux perturbations électromagnétiques, permet le transport des infos analogiques ou numériques. Bande passante correcte. Inconvénient : lourd, rigide, la connectique est délicate à installer en pratique dans une maison.

- a. **Mesure de la célérité des ondes à l'intérieur du câble**  
Quaranta IV à « Lignes électriques »

Matériel : un GBF, un oscillo, un câble coax d'une centaine de mètre, un té, deux câbles d'alimentation.

Branchement : Le té est installé en sortie du GBF. L'une des voies part dans le long câble coax dont on laisse l'autre extrémité à l'air libre (impédance infinie, réflexion totale). L'autre voie part dans l'oscillo

Protocole : Générer un burst sinusoïdal (1 cycle i.e. une impulsion) d'amplitude quelques Volt avec le GBF. L'impulsion se transmet dans le câble coax, est réfléchi sur l'extrémité libre. Sur l'oscillo (mode single, trigger ~ 1 V), on voit le signal envoyé puis, un peu après, le signal réfléchi. Mesurer l'écart de temps entre les deux pulses.

Interprétation : Soit L la longueur du câble. On a  $v = \frac{2L}{\Delta t}$  et  $\Delta v = v \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}$  Soit  $v = \pm$  m/s.

La notice du câble mentionne « velocity ratio : 66% ». On s'attend donc à trouver  $v = 0.66 c \approx 2.0 \cdot 10^8$  m/s (aucune incertitude associée). Normalement on n'est pas trop mal.

#### b. Mesure de l'impédance caractéristique

Quaranta IV à « Lignes électriques »

Matériel : tout pareil que précédemment + une boîte à décades + un ohmmètre

Branchement : tout pareil que précédemment sauf qu'on place la boîte à décade à l'extrémité du câble coax.

Protocole : On envoie un signal sinusoïdal de fréquence 5 MHz. On modifie la valeur de la résistance R en sortie du câble jusqu'à annuler autant que possible le signal à l'oscilloscope.

Interprétation : A l'extrémité du câble, le facteur de réflexion en amplitude vaut  $r = \frac{Z-R}{Z+R}$ . Lorsque  $R=Z$ , le coefficient de réflexion est nul ; l'onde n'est pas réfléchi et n'apparaît pas à l'oscillo. Une fois le signal annulé, sortir la boîte à décade du montage et mesurer sa résistance à l'ohmmètre. On trouve  $Z = R = \pm$   $\Omega$ . Le constructeur indique  $Z = 50 \pm 3 \Omega$ . Normalement, on n'est pas trop mal.

OdG : 50  $\Omega$  (instrumentation), 75  $\Omega$  (TV), 600  $\Omega$  (téléphonie).

Choix de la valeur de la fréquence : la fréquence ne doit pas être trop faible pour deux raisons (je crois) :

- Grandes fréquences = petites longueurs d'onde < taille circuit  $\rightarrow$  le phénomène de propagation se manifeste bien

- Si on tient compte des pertes,  $Z = \sqrt{\frac{R+i\omega L}{G+i\omega C}}$ . Omission des pertes valable ssi  $\omega$  est grand de sorte à retrouver  $Z = \sqrt{L/C}$

En fonction de mon humeur et de ma sérénité, peut-être effectuerais-je le calcul suivant :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{donc } C = \frac{1}{Zv} = \pm \quad pF/m \quad \Delta C = C \sqrt{\left(\frac{\Delta Z}{Z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2}$$

Le constructeur donne  $C = 100 \pm 5$  pF/m

#### c. Mesure de la fréquence de coupure

Tous les modes de transmission sont plus ou moins des filtres bas. Jusqu'à quelle fréquence peut-on transmettre un signal dans un câble coax sans trop d'atténuation ?

Matériel : Pareil qu'en a.

Branchement : pareil qu'en a. mais relier l'extrémité libre du câble à la voie 2 de l'oscillo. **REGLER LA VOIE D'ENTREE DU CÂBLE SUR 50  $\Omega$**  pour éviter les réflexions.

Protocole : réaliser le diagramme de Bode en fréquence du câble entre 1 Hz et le max du GBF. On trouve  $f_c \sim$  MHz

On remarque qu'un signal carré ou triangle est rapidement distordu, même pour un fondamental à quelques centaines de Hz, à cause des harmoniques qui se retrouvent au-dessus de la fréquence de coupure.



*Nous avons caractérisé un outil qui permet le transport de l'information. Le câble coaxial est typiquement utilisé pour relier l'antenne au poste TV. Voyons maintenant deux moyens de mettre en forme et de lire l'information : les modulations AM et FM.*

## II. MODULATION AM

Pourquoi moduler ? Imaginons que l'on souhaite transporter un signal radio de largeur spectrale 20 Hz  $\rightarrow$  20 kHz. Tout d'abord, il serait impossible de distinguer RTL de NRJ si ces radios émettent dans ces fréquences en même temps. Ensuite, il faudrait des antennes grandes comme environ  $\lambda$  soit  $(3.10^8)/10^3 = 300$  km (émission à 1 kHz)  $\rightarrow$  euh non. Et même si

c'était hypothétiquement possible, on voit que l'antenne ne serait pas apte à réceptionner toutes les longueurs d'onde ! Par ailleurs en pratique, c'est juste impossible de transmettre par voie hertzienne un signal entre 20 Hz et 20 kHz : trop d'atténuation. D'une manière générale, le signal informatif devra être modulé dès lors qu'il est intransportable à sa fréquence dans le canal choisi.

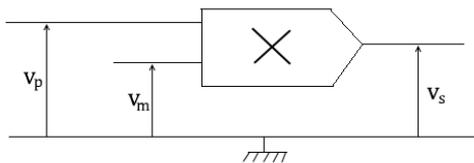
Qu'est-ce qu'on fait ? On translate la fréquence ! En transportant une porteuse de fréquence bien plus grande (et adapté à la bande passante du canal choisi, ici la propagation libre hertzienne), il devient faisable de construire des antennes grandes comme  $\lambda$  et la plage spectrale relative est plus faible.

Exemple : pour la modulation AM, la fréquence de la porteuse varie entre 100 kHz et 1 MHz, soit  $\lambda$  entre 100m et 1km. Pour une porteuse à 1 MHz, la plage spectrale devient (1 000 020 → 1 020 000) Hz donc une antenne saura réceptionner à peu près toutes les fréquences.

La modulation d'amplitude consiste à faire se propager une onde porteuse de fréquence élevée dont l'amplitude a été modifiée par le signal informatif.

### a. Présentation de l'étage de modulation, détermination d'un taux de modulation

Matériel : 2 GBF, un multiplieur, un oscillo



$$\text{GBF 1 : } v_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t) \quad \text{GBF 2 : } v_m(t) = A_0 + A_m \cos(2\pi f_m t + \phi_m)$$

$$\text{En sortie du multiplieur } v_s(t) = \underbrace{k_1 A_0 A_p}_{A} \left( 1 + \underbrace{\frac{A_m}{A_0}}_m \cos(2\pi f_m t + \phi_m) \right) \cos(2\pi f_p t)$$

Le taux de modulation  $m$  dépend de l'amplitude ET de l'offset du signal modulant le cas échant.

La porteuse sera correctement modulée si  $f_m \ll f_p$  : il ne faut pas que le signal informatif varie plus vite que la porteuse.

$$v_s(t) = A \left[ \cos(2\pi f_p t) + \frac{m}{2} \cos(2\pi (f_p + f_m) t + \phi_m) + \frac{m}{2} \cos(2\pi (f_p - f_m) t + \phi_m) \right]$$

Lorsque l'on fait la TF du signal, trois pics apparaissent aux fréquences entourées ci-dessus.

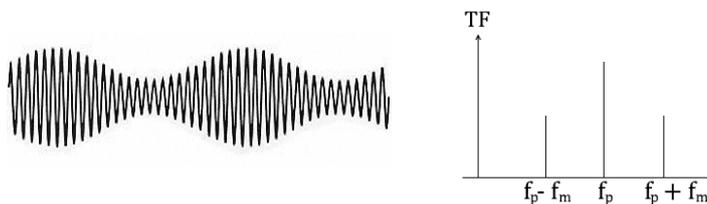
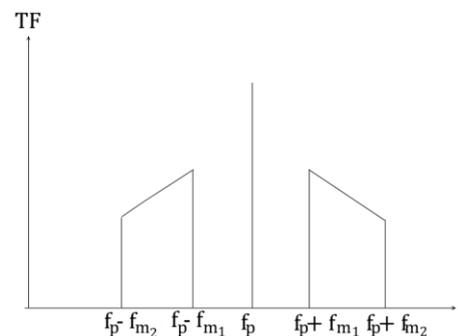


Figure 1 : signal modulé en amplitude résultant de la modulation d'une porteuse de fréquence élevée par un signal modulant sinusoïdal de fréquence plus faible.

Figure2 : TF associée

Remarques :

- Ici, le signal informatif possède une seule fréquence → 3 pics dans la TF du signal modulé. Pour un signal modulant d'encombrement spectral  $[f_{m1} ; f_{m2}]$ , des bandes apparaissent autour de  $f_p$ . Pour éviter un repliement, il faut  $f_p - f_{m2} > 0$  (voir figure ci-contre).
- On voit que les deux côtés de la TF ( $> f_p$  et  $< f_p$ ) sont symétriques et donc on pourrait se passer de l'une d'entre elles. Cela s'appelle la modulation à Bande Latérale Unique (B.L.U.). La bande occupée prend moins de place → rendement énergétique meilleur mais en contrepartie, les (dé)modulateurs sont plus complexes.
- Le multiplieur est un composant électronique qui multiplie les deux signaux d'entrée modulo un coefficient  $k_1$  :  $v_s(t) = k_1 * v_p(t) * v_m(t)$ , avec ici  $k_1=0.1 \text{ V}^{-1}$ . Il crée de nouvelles fréquences, il est donc non linéaire.
- Lorsque  $v_m$  n'a pas d'offset, le pic central à la fréquence  $f_p$  disparaît → « modulation sans porteuse ».



Sont présentés qualitativement dans cette partie :

- L'effet du **taux de modulation** (montrer la surmodulation) en jouant sur  $A_m$  et  $A_0$
- Regarder en mode normal et en **mode XY**
- Montrer la modulation de la porteuse par un **signal carré / triangle...**

- Regarder les **TF** associées à tout le monde, rechercher les **pics désirés**, mettre en évidence le **repliement** lorsque le signal modulant est à spectre infini (carré, triangle...)
- Regarder **avec et sans offset**, montrer que sans offset, le pic en sortie à la fréquence  $f_p$  disparaît.

☼ Manip' quantitative : **Détermination du taux de modulation**

$$m = \frac{A_m}{A_0} = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}}$$

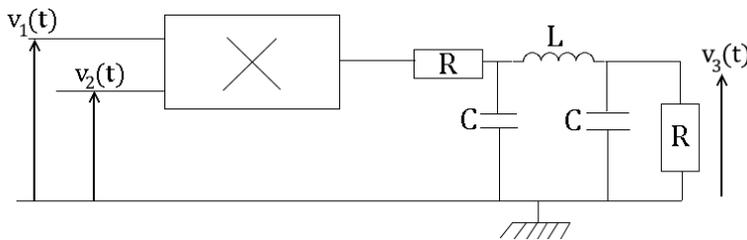
$$\left. \begin{array}{l} A_{max} = \pm V \\ A_{min} = \pm V \end{array} \right\} m = \pm$$

Valeur attendue compte-tenu de  $A_m = \pm V$  et  $A_0 = \pm V : m = \pm$

La modulation en amplitude a été étudiée. Dans la vraie vie, ce signal (radio par exemple) est envoyé par des antennes émettrices et se propage librement par voie hertzienne. Il est capté par une antenne réceptrice et démodulé. Ce mode de transmission ne sera pas étudié ici, donc nous allons directement relier électriquement notre étage de modulation à notre étage de démodulation afin d'étudier ce dernier.

**b. Démodulation par détection synchrone**

Matériel : celui de modulation + un multiplieur et de quoi faire le filtre passe bas de votre choix



La détection synchrone consiste à multiplier le signal modulé précédent avec un signal de même fréquence que sa porteuse et en phase (condition  $\square$ ) avec elle, puis à filtrer passe-bas.

Ici,  $v_1(t) = v_s(t)$  et  $v_2(t) = v_p(t)$

On a donc  $v_3(t) = k_2 A' [1 + \cos(2\pi f_m t + \phi_m)] \cos^2(2\pi f_p t)$ . Le développement des cosinus montre que le signal est composé de 4 fréquences :  $f_m, 2f_p - f_m, 2f_p$  et  $2f_p + f_m$ . Si  $f_m \ll 2f_p - f_m$ , alors un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure se trouve entre  $f_m$  et  $2f_p - f_m$  permet de retrouver le signal à la fréquence  $f_m$ . Pour ce montage, nous avons choisi un filtre passe-bas du 4<sup>è</sup> ordre câblé nous-même, parce qu'on est des fifous.

Manipulations qualitatives :

- Faire varier la fréquence de notre signal modulant (sans dépasser la fréquence de coupure de notre filtre) et admirer la superbe démodulation en comparant avec le signal informatif de base sur l'oscillo
- Faire varier le taux de modulation, et vérifier qu'avec  $m > 1$  ça marche toujours (badass)
- Regarder la démodulation lorsque le signal modulant est un créneau, un triangle... Le filtre enlève des harmoniques mais si sa fréquence de coupure n'est pas trop basse, c'est quand même très correct.

Toujours qualitatif mais un peu plus sérieux :

- **Multiplexage** : prendre 2 autres GBF, un AO (soustracteur) et un multiplieur. Créer un signal par exemple triangle, modulé par une porteuse ayant une fréquence différente de la porteuse du 1<sup>er</sup> signal. Sommer les deux signaux modulés avec un soustracteur. Envoyer sur l'étage de démodulation et regarder qu'en fonction de ce qu'on branche en entrée du multiplieur (porteuse 1 ou 2), on récupère en sortie soit le signal 1, soit le signal 2. Youpi !
- **Fading** : pour la démodulation, le signal par lequel on multiplie le signal modulé doit être en phase avec la porteuse de celui-ci (condition  $\square$ ). J'ai donc carrément utilisé le même signal porteuse. Sauf qu'en pratique, notre radio-réveil n'est pas relié au GBF qui délivre la porteuse d'Europe 1. Cela se traduit par le fait qu'en prenant un autre GBF (qui ne satisfait donc pas la condition  $\square$ ), des oscillations à BF de l'amplitude du signal démodulé apparaissent. Le montrer. Comment résoudre cela ? Avec une boucle à verrouillage de phase (PLL) que l'on intègre au montage avant l'étage de démodulation. Pour plus d'infos sur la réalisation pratique : voir Maxime ou bien le Manneville. Utiliser, câbler, comprendre la PLL est plus subtil ici (besoin de filtres supplémentaires, de déphaseurs...) qu'en démodulation en fréquence, donc on a préféré faire la PLL sur la démodulation FM.



La modulation en amplitude a été utilisée historiquement par les 1<sup>ères</sup> radios dans la 1<sup>ère</sup> moitié du XX<sup>e</sup> siècle. On l'utilise encore aujourd'hui pour les talkiewalkies ou bien dans la radiocommunication aéronautique. Une autre technique de modulation existe également : la modulation FM.

### III. MODULATION FM

Cette fois-ci, un signal porteur  $v_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + \phi_p)$  va voir sa fréquence ( $\equiv$  sa phase) instantanée  $\psi(t)$  varier en fonction d'un signal informatif  $v_m(t) = \cos(2\pi f_m t)$  selon la relation affine  $f(t) = f_p + k v_m(t)$ , avec k un facteur de proportionnalité en Hz/V.

Le signal modulé s'écrira  $v_s(t) = A_p \cos(\psi(t))$ , La relation liant phase et fréquence instantanées est  $f(t) \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt}$ .

On en déduit la forme du signal modulé :  $v_s(t) = A_p \cos\left(2\pi f_p t + \frac{kA_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t)\right)$ .

On définit l'**indice de modulation**  $m$  comme étant le rapport de l'excursion maximale de fréquence  $kA_m = \Delta f$  sur la fréquence de modulation  $f_m$ .

#### a. Etape de modulation

Il existe plusieurs manières de réaliser la modulation en fréquence d'un signal (modulateur d'Armstrong...). Nous avons choisi la plus simple expérimentalement : la modulation par un Oscillateur Commandé en Tension (OCT), réalisée par les GBF Agilent.

Matériel : un oscillo, 2 GBF, des câbles

Protocole / branchements : Créer le signal informatif avec un premier GBF. Relier la sortie de ce GBF à l'entrée Modulation In située dans les fesses du 2<sup>e</sup> GBF. Créer la porteuse avec ce GBF (sinus, à  $f_p$ , amplitude  $A_p$ ), puis réaliser la modulation automatique de ce signal en appuyant sur Mod, type, FM, source Ext. Le Freq Dev affiché est tel que  $k \equiv \text{Freq Dev} / 5$ . Le 2<sup>e</sup> GBF joue le rôle d'OCT : la porteuse qu'il créé est modulée par la tension du signal informatif.

Manipulations qualitatives :

- Regarder pour  $v_m$  constant qu'augmenter  $A_m$  revient bien à augmenter la fréquence du signal modulé.
- Regarder pour  $v_m =$  un sinus lentement variable la modulation « en live »

#### ☀ Manipulation quantitative : **Étalonnage de l'OCT**

Envoyer diverses tensions constantes V entre -5 et +5 V dans l'OCT et regarder la valeur de la fréquence f du signal modulé.

Tracer f en fonction de V et en déduire la valeur de k (pente de la droite). On trouve  $k_{\text{expe}} = \pm \text{ Hz/V}$

La valeur attendue est  $k = \text{Freq Dev} / 5$ . On trouve  $k_{\text{attendu}} = \pm \text{ Hz/V}$

#### ☀ Manipulation quantitative : **Détermination d'une excursion en fréquence**

Envoyer dans l'OCT un signal sinusoïdal  $v_m$  tel que l'indice de modulation soit  $\gg 1$  (par ex.  $A_m = 250 \text{ mV}$ ,  $f_m = 1000 \text{ Hz}$  et  $\text{Freq Dev} = 100 \text{ kHz}$  ( $\rightarrow f_p = 100 \text{ kHz}$ )). Regarder sur l'oscillo simultanément une période du signal informatif et le signal modulé. Grâce aux curseurs de mesure, estimer  $f_{\text{max}}$  et  $f_{\text{min}}$ .

$$\left. \begin{array}{l} f_{\text{max}} = \pm \text{ kHz} \\ f_{\text{min}} = \pm \text{ kHz} \end{array} \right\} \Delta f = \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{2} = \pm \text{ kHz}$$

La valeur attendue est  $\Delta f = kA_m = \pm \text{ kHz}$

$$u(\Delta f) = \frac{1}{2} \sqrt{(u(\Delta f_{\text{max}}))^2 + (u(\Delta f_{\text{min}}))^2}$$

#### ☀ Manipulation quantitative : **Vérification de la règle de Carson**

La règle de Carson stipule que l'encombrement spectral ( $\equiv$  la largeur de la bande occupée) d'un signal modulé en fréquence vaut  $B \approx 2(1 + m)f_m$ . C'est un «  $\approx$  » car théoriquement, il existe un nombre infini de composantes spectrales dans le signal modulé. En pratique, une petite portion du spectre contient 98 % de la puissance du signal, c'est cette portion que quantifie la règle de Carson. Pour différente valeur de  $A_m$  correspondant à des indices de modulation variant entre 1 et 5, on trace le spectre de Fourier du signal modulé et on se débrouille pour trouver un critère qui soit plus ou moins proche des 98% de

Carson pour définir et mesurer la largeur spectrale du signal. On trace  $\frac{B}{f_m}$  en fonction de  $\frac{kA_m}{f_m}$  et on est censé obtenir une droite de pente  $a = 2$  et d'ordonnée à l'origine  $b = 2$ .

On trouve  $a =$  et  $b =$

La pente n'est normalement pas trop mauvaise mais  $b \neq 2$ . Ceci est dû à une erreur systématique dû à notre critère de sélection arbitraire pour la définition de la largeur, qui ne peut pas être rigoureusement celle de Carson, a priori.

### b. Démodulation : la boucle à verrouillage de phase

Pour démoduler le signal modulé en fréquence, nous allons utiliser une boucle à verrouillage de phase. Le principe est le suivant. Dans l'idée, il s'agit de faire une démodulation synchrone, comme au II. : on multiplie notre signal modulé par un signal de même fréquence et en phase (pour rejeter toutes les fréquences autres que  $f_m$  plus loin en fréquence) avec un multiplieur et on filtre PB (ici avec un RC). Tout le problème est dans la phrase « signal de même fréquence en phase » car notre signal modulé possède une phase et une fréquence qui varient à tout instant. On utilise alors une PLL (comme Boucle à Verrouillage de Phase).

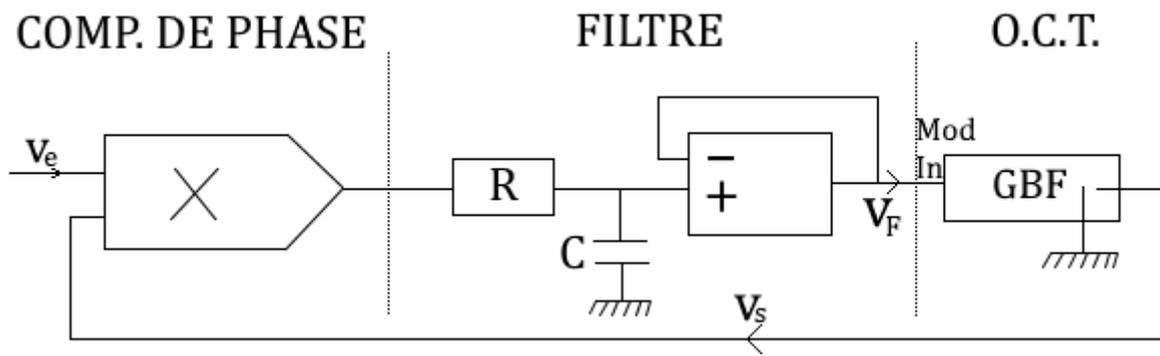


Schéma électrique d'une PLL

L'OCT a pour rôle de fournir un signal  $v_s$  dont la phase instantanée suit celle de  $v_e$ . On multiplie  $v_s$  par  $v_e$  avec un multiplieur. Le signal de sortie contient alors un terme proportionnel au déphasage entre  $v_e$  et  $v_s$ . Le filtre RC filtre PB et on a intercalé un suiveur pour éviter tout problème d'impédance vis-à-vis de l'entrée Mod In du GBF. A ce niveau, le but est d'obtenir  $v_F = v_m$  : en effet, si on a  $v_m$  en sortie du filtre, alors l'OCT va renvoyer précisément  $v_e$  (nous sommes exactement dans la situation de modulation). Et alors on détecte synchrone comme prévu. L'enjeu est donc de régler l'OCT correctement pour qu'il puisse réussir à « s'accrocher » i.e. à verrouiller et à suivre les variations.

En particulier, un OCT est défini par (entre autres) 2 paramètres : sa plage de capture et sa plage de verrouillage.

Plage de verrouillage  $\Delta f_v$  : intervalle de fréquences pour  $v_e$  pour lequel la boucle peut suivre et rester verrouillée, lorsqu'au départ elle est verrouillée. Pour avoir une idée :  $\Delta f_v \propto k_3 \cdot k_3 \cdot V_e V_s$ . Avec  $k_3 = 0.1 \text{ V}^{-1}$  le coefficient multiplicateur du multiplieur. Il faut donc blinder sur l'amplitude de  $V_e$  pour augmenter nos chances de verrouillage.

Plage de capture  $\Delta f_c$  : intervalle de fréquences pour  $v_e$  à atteindre pour que la boucle se verrouille lorsqu'elle n'est initialement pas verrouillée.

On a toujours  $\Delta f_c < \Delta f_v$  (hystérésis). Notre PLL va donc fonctionner si :

- La fréquence instantanée de  $v_e$  reste toujours dans la plage de verrouillage de la boucle, i.e.  $\Delta f < \Delta f_v$  avec les notations précédentes.
- La fréquence de modulation  $f_m$  est dans la partie passe bas du filtre !

#### Manipulations qualitatives :

- Admirer l'**hystérésis** de la boucle entre  $\Delta f_c$  et  $\Delta f_v$  en envoyant d'abord un signal porteur non modulé et HF. Constaté que les signaux d'entrée et de sortie sont en phase temporellement mais déphasés constamment entre 0 et  $\pi$  en fonction de là on se trouve dans la plage de verrouillage. *Regarder en sortie du GBF OCT*
- Monter le montage complet avec le signal modulé. *Regarder en sortie du filtre* si l'on retrouve notre signal modulant 😊. Tips : comme notre plage de verrouillage est assez faible (qlq kHz, car  $k$  est malheureusement petit - le GBF du Duffait a un  $k$  5 fois plus gros), il faut envoyer un signal modulant ayant une faible amplitude, de sorte à avoir un  $\Delta f$  compatible avec la plage de verrouillage.

**Conclusion** : On s'est bien marré.

**Ouverture** : Il existe d'autres moyens de transmission : voie hertzienne, ou fibres optiques. On n'a pas parlé des signaux numériques, mais ils sont eux aussi modulés → principe du modem et modulation FSK.

Commentaires / opinions / questions / remarques / objections / liste des courses semaine ski / recette du gâteau de Pierre :