

[M23] Mise en forme, transport et détection de l'information

Compte-rendu

Clara Schattner, Pierre Janiszewski*
Correcteur : J.-B. Desmoulins

22 octobre 2015

Recommandations

Contexte

Des cinq dernières promotions, aucun candidat de Cachan n'a présenté ce montage le jour de l'oral. L'intitulé n'a pas évolué depuis cinq ans, à l'image des commentaires trouvés dans les rapports de jury (excepté 2012, plus prolixe) :

(2015, type) *Ce montage ne se restreint pas à la modulation d'amplitude. Il semble en particulier 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.*

(2012, exhaustif) *Comme l'indique son titre, ce montage comporte 3 parties d'égale importance ; il se prête bien à la réalisation d'une chaîne complète traitant des 3 aspects. Il est souhaitable de connaître les différentes solutions technologiques employées dans les applications de la vie quotidienne. Ce montage ne doit pas se restreindre à la modulation et démodulation d'amplitude. Dans le cas de la démodulation synchrone, le problème de la récupération de la porteuse doit être soigneusement étudié. 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.*

La construction de ce montage s'appuie essentiellement sur les TP **Modulation et démodulation de fréquence** et **Translation de fréquence** proposés par Mgr JBD. Des informations complémentaires peuvent être tirées de la maigre bibliographie utilisée, ou glanées sur le Net.

Choix effectués

(i) Contrairement à ce qu'incite le rapport de 2012, nous n'avons pas traité la partie 'transport de l'information' avec autant d'importance que les deux autres ; aucune expérience ou mesure ne lui a été dédiée. Deux raisons au moins :

- ★ À notre avis, une telle expérience est compliquée à réaliser, une mesure quantitative intéressante encore plus. On peut imaginer étudier la distorsion/atténuation d'un signal électrique transporté à travers un long câble coaxial (le labo en a un qui fait plus de dix mètres) mais il n'est pas sûr que le résultat obtenu soit probant. Par ailleurs, passer du temps sur une telle mesure doit pouvoir être justifié compte tenu du message à transmettre.
- ★ Les deux autres aspects prennent déjà suffisamment de temps si les explications se veulent éclairantes.

On a donc préféré organiser le montage autour des deux problématiques 'mise en forme' et 'détection', en dilluant dans le discours l'aspect 'transport' de l'information.

*Pour toute question ou suggestion sur la rédaction : pierre.janiszewski@ens-cachan.fr

- (ii) La discussion doit être menée sur le choix d'aborder ou non le cas des signaux numériques. Sur le fond, il y aurait beaucoup de choses à dire, d'autant plus que le numérique, plus que l'analogique, est désormais notre quotidien. Le problème, à notre avis, est que cette approche promet difficilement les capacités expérimentales du candidat. On peut par exemple songer à présenter la modulation FSK directement à l'aide d'un générateur Agilent, rajouter du bruit et analyser la déformation de l'information récupérée numériquement par une des cartes reprogrammées du labo, le traitement étant fait sous Discovery. Toute autre suggestion est la bienvenue.

Nous avons pris le parti de seulement évoquer le cas des signaux numériques en ouverture, quitte à amener les questions du jury sur ce terrain : de nombreuses informations se trouvent dans la plupart des ouvrages et permettent de se défendre.

- (iii) Pour les signaux analogiques, les modulations AM, FM et PM ont toutes des arguments pour être traitées dans ce montage. Nous avons fait notre choix en répondant aux questions de base :

★ Quel message transmettre ? On peut axer la réflexion sur une comparaison de la sensibilité au bruit des modulations FM et AM ; on peut avoir une approche très visuelle de la modulation en amplitude, de comment se ramener d'une modulation FM à une démodulation AM par l'intermédiaire d'un détecteur de crêtes ; on peut aborder la démodulation AM en deux temps (détecteur de crête puis PLL)...

★ Où réaliser des mesures quantitatives d'intérêt ?

Nous avons choisi d'étudier la modulation et la démodulation en fréquence pour cinq raisons au moins : cela permet de bien insister sur l'importance de l'encombrement spectral du signal modulé vis à vis de la conception des canaux de transmission, une telle construction est progressive et la démodulation FM ne peut se faire sans avoir étudié la modulation FM, plusieurs mesures quantitatives bien utiles pour le propos sont réalisables, il y a une bonne progression dans la difficulté des expériences, enfin notre sens esthétique s'est vu plus émoustillé par le fait de coder l'information dans la fréquence de la porteuse.

[*Tout autre choix est défendable, notamment celui de traiter la démodulation AM par PLL (démodulation synchrone avec récupération de porteuse) qui a des applications majeures en instrumentation.*]

Montage proposé

[*Les remarques et questions du correcteur sont intégrées directement au propos présenté lorsqu'il s'agit d'améliorer ce qui peut être dit pendant la présentation. Sinon, elles font l'objet d'un encart en plus.*]

Introduction

Derrière l'intitulé se cache la question de savoir comment transmettre à distance plusieurs informations simultanément.

Nécessité de mettre en forme le signal

Plusieurs arguments massues :

→ La bande de base de l'audible est [20Hz ; 20kHz] ; si tout le monde émet directement à ces fréquences, on ne pourrait pas séparer les informations.

→ Pour émettre un champ électromagnétique à fréquence 20Hz, il faudrait des antennes d'une taille de l'ordre de $\lambda \sim 10^7$ m.

→ Une onde audible n'est pas assez énergétique pour être transmise telle quelle sur une distance suffisante et sans distortion du signal.

Ces problèmes justifient qu'on transmette l'information par l'intermédiaire de signaux hautes fréquences : les porteuses.

Ordres de grandeurs

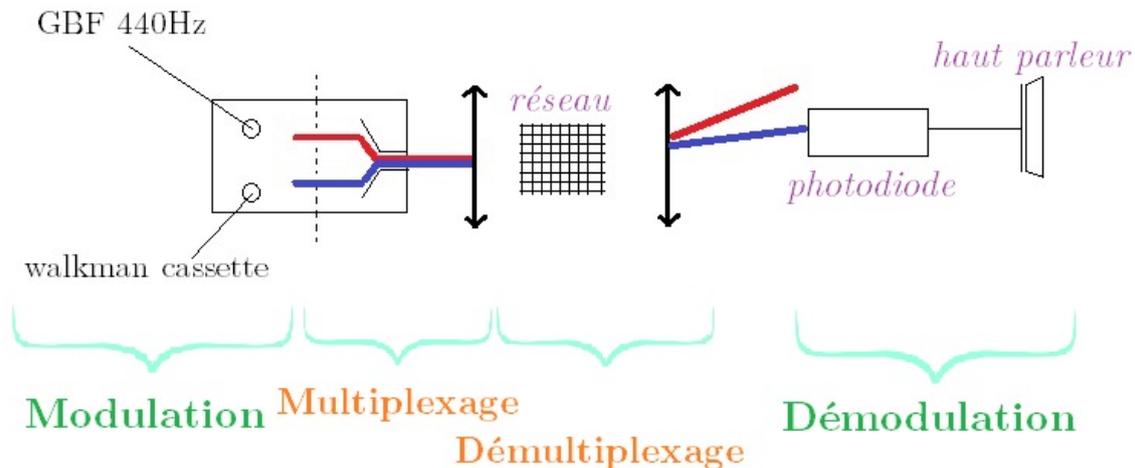
★ Radio : 80MHz à 110MHz ;

★ Téléphonie 2G : ~ 900 MHz et ~ 1800 MHz.

1 Expérience qualitative : la radio par porteuse optique

[Cette première expérience, simple, permet de poser le vocabulaire du montage et d'illustrer la transmission de plusieurs informations simultanément par porteuses optiques.]

Montage



Matériel utilisé :

- ★ boîte multiplexage et son alimentation, reliée à deux informations différentes ;
- ★ deux lentilles de focale 5cm par exemple et un réseau 1000 traits/mm ;
- ★ une photodiode alimentée, reliée à
- ★ un haut-parleur amplifié ;
- ★ un écran blanc.

Propos tenus

L'approche suivie est linéaire, construite autour des quatre maillons de la chaîne.

1. On souhaite transmettre une information audio par porteuse optique. Pour cela, on dispose d'une boîte dans laquelle deux LED rouge et bleu émettent un flux lumineux dont l'amplitude est contrôlée en tension par :
 - un offset réglable sur le boîtier, qui permet de se placer dans une région où la réponse des led est linéaire en la tension de commande ;
 - des variations autour de cette offset générées par l'information à transmettre.
 Cette opération est appelée **modulation**. Ici, l'information, dite signal **modulant**, est donc inscrite dans l'amplitude de la porteuse et le signal résultant s'appelle le **modulé**.
2. Dans l'idée que plusieurs informations se propagent simultanément, un bout de fibre plastique est là pour faire converger les deux faisceaux colorés en un faisceau unique. C'est l'opération de **multiplexage**.
3. Du point de vue du récepteur, il convient dans un premier temps de discriminer les fréquences porteuses mélangées spatialement dans le faisceau lumineux. C'est l'opération de **démultiplexage**, réalisée par un réseau 1000 traits/mm.
4. Enfin, l'information de départ est récupérée en interceptant l'un des premiers ordres de déviation à l'aide d'une photodiode, qui convertit le flux lumineux en intensité. C'est l'opération de **démodulation**. Le tout est relié à un haut-parleur qui reproduit l'information dans la salle.

Cette chaîne est en réalité bien plus qu'un simple exemple pédagogique :

- en pratique on transmet de plus en plus d'informations par fibre optique, à des longueurs d'onde plutôt de l'ordre de $1\mu\text{m}$ (les couleurs du visible sont employées ici à des fins pédagogiques) ;

- le premier téléphone était en réalité un photophone, conçu par Alexander Bell en 1880, dont le principe est de transmettre l'information à l'aide de la lumière.

Commentaires pratiques

- ★ Il est absolument nécessaire de monter la chaîne (branchement des câbles, placement des optiques) pendant le discours plutôt que de présenter le montage déjà tout prêt : ce n'est pas une épreuve de leçon. De plus, pour donner plus de valeur à cette expérience, il convient de régler rapidement et en direct les LED. Pour cela, accoler la photodiode à la sortie de la boîte et la relier à un oscilloscope, observer la plage de linéarité de la réponse et choisir une amplitude du signal information adéquate.
- ★ Les lentilles permettent de bien faire converger les faisceaux lumineux. Un réseau 1000 traits/mm permet de bien séparer les deux tâches ; 600 traits/mm convient à la limite, mais au risque d'entendre les deux sons en même temps (ce qui peut être intéressant à montrer).
- ★ Globalement, la manip' fonctionne bien et sans difficultés, sous réserve que la photodiode réceptrice ne soit pas endommagée. Si le signal qu'elle délivre est de l'ordre de 10mV, son remplacement est nécessaire.

Questions du correcteur

Sur le fonctionnement de la photodiode :

- *Que fait la photodiode (quelle est sa transduction) ?*
Elle transforme un flux lumineux en courant électrique. Si on travaille avec des intensités lumineuses suffisamment importantes, a priori le courant fourni doit être proportionnel à la puissance reçue.
- *Comment observer une tension à partir de là ?*
Il faut une résistance pour travailler avec des tensions. Soit le courant est envoyé directement à l'oscilloscope, soit on utilise un boîtier alimenté qui assure la conversion.
- *Qu'est-ce qui joue sur la dynamique de réponse de la photodiode ?*
La dynamique de la photodiode est contrôlée par sa polarisation. Plus la tension de polarisation est forte en inverse (mais pas trop pour pas que ça claque), plus la capacité de jonction est réduite et donc plus la réponse est rapide.
Envoyer le courant sur l'oscilloscope sans boîtier de polarisation ne convient que pour un éclairage qui ne varie pas.

2 Modulation de fréquence

[Dans cette partie, on présente la modulation de fréquence par le rôle de deux paramètres importants (Δf et f_m) et on la caractérise par le critère de la bande de Carson.]

Montage

Le montage est simple : on réalise la modulation à l'aide d'un GBF Agilent ; le signal est visualisé sur un oscilloscope.

Propos tenus

On considère une information $m(t)$ et une porteuse sinusoïdale à fréquence f_p . Le modulé est une sinusoïde de fréquence $f_p + K \times m(t)$. Pour simplifier, on considère une information sinusoïdale de fréquence f_m . Le modulé est alors :

$$u(t) = A \cos \left(2\pi f_p t + \frac{\Delta f}{f_m} \cos(2\pi f_m t) \right) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \left(\frac{\Delta f}{f_m} \right) \cdot \cos(2\pi(f_p + n f_m)t)$$

a. Deux paramètres caractéristiques (qualitatif)

→ f_m code la vitesse de variation,

→ Δf code l'amplitude des variations de la fréquence de la porteuse

On peut visualiser cela sur le scope. Prendre ($f_m \sim 1\text{Hz}$, $\Delta f \sim 1\text{kHz}$, $f_p \sim 30\text{kHz}$), mettre la trace et faire varier la déviation en fréquence. Puis fixer Δf , rafraîchir la trace et faire varier f_m de 1Hz à 30kHz. On peut utiliser le bandeau de mesures statistiques pour vérifier qu'on a un f_{min} et un f_{max} autour d'une médiane.

b. Encombrement spectral (quantitatif)

- (i) Le signal modulé occupe une certaine plage de fréquences. Son spectre peut être visualisé sur l'oscilloscope et on peut rapidement vérifier que les pics visualisés correspondent aux $f_p \pm n f_m$. Dans cette plage de fréquence, on ne pourra pas coder d'autre information, au risque de brouiller le tout. Il est donc absolument nécessaire de caractériser cette plage occupée, appelée **encombrement spectral**.

Le critère retenu est celui dit de la **bande de Carson** :

98% de la puissance spectrale se répartie sur une plage, appelée bande de Carson et définie par :

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

- (ii) On vérifie que ce critère est bien vérifié en relevant à la main, au scope, l'amplitude de chaque harmonique du signal précédent, en dBV, et on évalue sous Igor la puissance spectrale par la formule :

$$\mathcal{P} = \sum_n 10^{G_n/10}$$

On applique cette formule pour l'ensemble des pics visibles d'une part (ce qui donne \mathcal{P}_{tot} et d'autre part pour les pics 0 à k , pour tous les k visibles (on obtient ' \mathcal{P}_k '); puis on calcul $\mathcal{P}_k/\mathcal{P}_{tot}$ pour tous les k . On vérifie que, pour avoir 98% de la puissance spectrale au moins, il faut prendre tous les pics contenus dans la bande de Carson.

- (iii) Cette mesure est réalisée sur un cas simple et son succès doit être nuancé dans la mesure où les résultats possibles ne sont pas nombreux. Pourtant, il n'est pas envisageable de la réaliser ainsi pour un signal comportant de nombreuses harmoniques.

Pour aller plus loin et donner plus de saveur au critère de la bande de Carson, on peut considérer un signal modulant plus complexe (un carré, par exemple) et utiliser la macro sous Igor qui évalue les puissances spectrales.

Une alternative consiste à vérifier que la formule de la bande de Carson est vérifiée lorsqu'on fait varier Δf et/ou f_m , en utilisant la macro. L'interprétation : plus l'information est spectralement riche, plus il va falloir lui accorder de la place.

Remarques pratiques

- ★ Pour la visualisation en FFT, préférer un oscilloscope travaillant avec un nombre de points réduits si l'on cherche à visualiser ce qui se passe à basse fréquence ($f_m \sim 1\text{Hz}$) : les scopes récents qui calculent sur plus de 60k points rafraîchissent trop lentement. Par ailleurs, il faut être capable de justifier les paramètres choisis sur l'oscilloscope (durée d'acquisition, critère de Shannon respecté) pour le calcul de la FFT. Pendant la présentation, se placer dans les conditions où ça marche ; il n'est pas nécessaire de détailler à ce moment-là.

- ★ Pour la mesure de puissance, il est absolument nécessaire d'évaluer l'incertitude sur le calcul afin de donner un sens aux rapports trouvés. Pour cela, on peut utiliser les capacités du scope : dans le mode FFT, jouer sur les paramètres *offset*, *center*, *span* et sur la fenêtre de calcul (Hanning) pour avoir le plus de précision possible.

On constate que la trace n'est pas très stable en amplitude, notamment pour les pics de plus faible amplitude. Cela est le résultat de deux erreurs :

→ D'une part, le bruit ambiant a tendance à s'ajouter à l'harmonique et augmenter son amplitude. On pourrait penser prendre les valeurs les plus basses au scope pour compenser cette sur-évaluation.

→ D'autre part, même si la fenêtre de calcul est assez plate, le fait de sous-échantillonner assure qu'on sous-évalue systématiquement le maximum d'amplitude. Ne sachant pas si le calcul du scope est programmé pour corriger ce défaut, on pourrait penser prendre les valeurs les plus hautes de l'amplitude sur le scope.

Le mieux est donc peut-être d'utiliser la persistance de la trace pour prendre les extrema de l'amplitude et retenir pour valeur la moyenne des deux, avec l'incertitude qui en découle.

- ★ Utiliser la macro Igor implique de savoir ce qu'elle fait et de justifier comment on place les curseurs. Elle calcule la puissance demandée à partir non plus de l'amplitude des pics mais de l'amplitude de chaque point du spectre. Pour obtenir un rapport des puissances proche de 98%, positionner les curseurs dans le bruit, puis ajuster la mesure en les remontant sur les pics.

Questions supplémentaires

Sur la formule de la bande de Carson :

La formule donnée est valable pour une information sinusoïdale, qu'en est-il pour un vrai signal ?

À un instant donné, le signal modulé présente un certain nombre d'harmoniques. On peut retenir comme critère une bande :

$$B_{max} = 2(f_{m_i} + \Delta f_i)|_{max} = 2((1 + \beta_i)f_{m_i})|_{max} = 2(1 + \beta) f_{m_{max}},$$

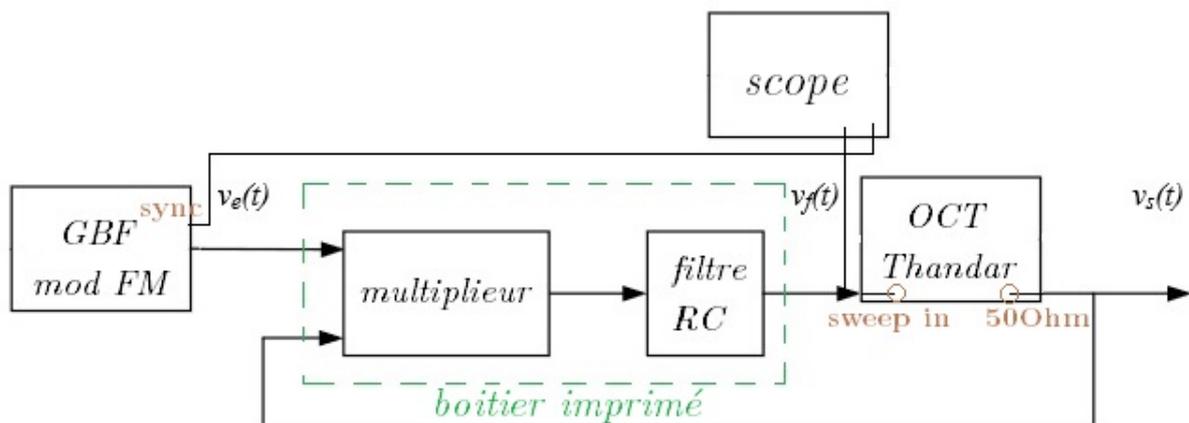
dans la mesure où, en pratique, $\beta = \Delta f / f_m$ est fixé.

On trouvera dans la bibliographie une autre formule en $\sqrt{\sum_i \Delta f_i}$.

3 La PLL comme démodulateur

[On se place désormais du point de vue du récepteur qui doit récupérer l'information cachée dans la fréquence du signal modulé. Il ne s'agit pas de présenter la PLL en tant que telle, mais dans son rôle de démodulateur de fréquence, en reliant plage de verrouillage et encombrement spectral notamment.]

Montage



Matériel utilisé :

- ★ GBF Agilent, Scope, OCT Thandar ;
- ★ Boitier comprenant un multiplieur intégré et les connections imprimées ;
- ★ Une résistance $1k\Omega$ et une capacité $1\mu F$ à brancher au niveau du filtre.

Propos tenus

- (i) La première étape de cette partie consiste à présenter rapidement le principe de la PLL et la monter en direct. Voir les remarques pratiques en suivant pour maximiser la probabilité de succès.

En entrée du multiplieur, les fréquences des signaux sont $f_e = f_p + K \times m(t)$ et $f_s = f_0 + K_{VCO} \times v_f(t)$ (d'après le fonctionnement de l'OCT). La PLL est un système d'asservissement à erreur statique nulle en fréquence. Par suite, lorsque l'asservissement est réalisé, on récupère à la sortie du filtre RC une **image électrique de l'information** :

$$f_s = f_e \implies v_f(t) = \frac{f_p - f_0}{K_{VCO}} + \frac{K}{K_{VCO}} \times m(t)$$

- (ii) Le régime permanent étant établi, en faisant varier la fréquence de la porteuse on met en évidence les plages de capture et de verrouillage.

Explication sans rentrer dans les détails :

- Lorsque la boucle n'a pas encore accroché (fréquence de la porteuse trop éloignée de celle de l'OCT), l'écart en fréquence est filtré par le passe-bas et peu de signal arrive en entrée de l'OCT, qui ne modifie pas suffisamment sa fréquence. La capture se fait dès lors que le signal en sortie du filtre n'est pas trop filtré, *i.e.* quand l'écart $f_p - f_0$ n'est pas trop grand.

- Lorsque la boucle a accroché, comme pour tout asservissement c'est la non-linéarité d'un composant de la boucle qui induit le déverrouillage. Ici, on admet que le filtre est en cause. Lorsque f_p s'éloigne trop de f_0 , le déphasage entre v_e et v_s s'éloigne trop de $\pi/2$ et le signal à la sortie du filtre devient trop faible : même histoire.

Ce qui nous intéresse essentiellement, c'est la plage de verrouillage qui permet de récupérer les harmoniques constitutives de l'information. En particulier, il faut que cette **plage de verrouillage contienne la bande de Carson**, sans quoi l'information est dégradée de manière non négligeable.

Pour adapter cette plage de verrouillage, l'opérateur peut contrebalancer la non-linéarité du filtre en jouant sur l'amplitude U_{VCO} du signal délivré par l'OCT.

On a cherché à vérifier que les fréquences de capture F_c^+ et F_c^- et de verrouillage F_v^+ et F_v^- vérifient :

$$F_c^\pm = F_{\text{filtre}} \pm f_0$$

$$F_v^\pm = f_0 \pm K_{VCO} U_{VCO}$$

Selon ce qu'on représente, mesurer ces fréquences avec précision n'est pas critique : en traçant les droites autour de $f_0 = 100\text{kHz}$, une incertitude de 1kHz est convenable. Sous réserve que la fréquence centrale ne varie pas 'trop' entre la préparation et le direct, les résultats collent.

On est donc en mesure d'adapter la plage de verrouillage pour qu'elle contienne la bande de Carson du signal modulé reçu.

On a observé un élargissement léger de la place de capture avec l'amplitude U_{VCO} . Une explication possible est la suivante : le filtre n'est pas parfait en ce sens qu'il laisse passer du signal même au-delà de sa fréquence de coupure ; le signal résultant est d'autant plus intense que l'amplitude en entrée est grande. La capture est donc plus facile si l'amplitude fournie par l'OCT est plus grande toutes choses égales par ailleurs.

- (iii) Les questions de la stabilité et du temps de réponse de la PLL sont importantes. Si l'information à transmettre est un carré, on observe en sortie du filtre un signal type réponse du second ordre, avec amortissement. Il y a un **compromis à trouver entre un système rapide et un système stable** : si le système est trop rapide, la réponse peut trop dépasser l'entrée pendant le régime transitoire suffisamment pour provoquer un décrochage. Ce compromis se règle par le choix des composants du filtre RC.

Avec les valeurs choisies ici (qui définissent par ailleurs la plage de capture), on peut mesurer le temps de réponse de la PLL : ici $\sim 2\text{ms}$. En pratique, l'oreille humaine perçoit moins bien des variations de fréquence à plus de 10Hz . C'est largement suffisant.

Remarques pratiques

- ★ En cas de mauvais fonctionnement de la PLL, d'une dépendance forte en la météo et d'incantations infructueuses, faire fi de la présomption d'innocence pour le filtre RC : il n'est pas inutile d'enfoncer dans le même trou une patte de la résistance et une patte de la capacité, de manière à maximiser le contact.
- ★ (*Astuce du feu de JBD*) Lorsque l'asservissement est réalisé, le signal à la sortie du passe-bas est un peu épais. Un Zoom montre qu'il reste un signal de fréquence élevé : le filtre n'est pas parfait et cette fréquence est $f_p + f_0$. S'en débarrasser par moyennage est une bonne idée, mais pour que cela fonctionne il faut que le nombre de ces petites oscillations ne soient pas un entier entre deux créneaux de synchronisation du GBF ; autrement dit, il faut que $f_p + f_0$ et f_m ne soient pas dans un rapport entier. Si $f_m = 1\text{kHz}$, on prendra une porteuse à $f_p = 100,040\text{kHz}$ par exemple, ou bien on générera le modulé à partir de deux GBF n'ayant pas la même horloge.
- ★ Il est probable que la fréquence f_0 change lorsque l'OCT est éteint puis rallumé (bouton rotatif sensible), ce qui fausse systématiquement les mesures des fréquences des plages de capture et de verrouillage (les droites se répartissent autour de f_0). Pour les mêmes raisons, manipuler les câbles avec précautions autour de cette zone pendant la présentation.

Conclusion

- ★ Les messages du montage en bref :
 - la transmission de l'information se réalise en plusieurs étapes (modulation, multiplexage, démultiplexage, démodulation) ;
 - la modulation de fréquence est réalisée à travers les deux grandeurs Δf et f_m et le point essentiel pour la transmission des informations est de caractériser l'encombrement spectral du modulé ;
 - la PLL est un démodulateur stable et ajustable qui convient aux exigences de la transmission radio.

- ★ Ouverture :

Le montage présenté est cadré par les signaux analogiques. En réalité, les signaux numériques sont désormais majoritairement utilisés et la transmission par le numérique a pour elle d'être moins sensible au bruit.

Question du correcteur : en quoi est-ce que le numérique c'est bien ?

L'information, c'est une suite de 0 et de 1, quelque soit la façon dont le message est codé ; même s'il y a du bruit et qu'on mesure 0.2, on prend 0 et l'effet du bruit est nul.

Supplément

[*D'autres approches alternatives sont possibles au montage proposé. La discussion sur les modulations AM, FM, PM des signaux numériques a été menée plus haut. Ici sont présentées les idées suggérées par le correcteur pour combler aux deux manques du montage vis à vis des recommandations dans les rapports.*]

Signaux numériques

Il serait intéressant de moduler un signal numérique (modulation FSK, par exemple), lui ajouter du bruit et regarder la qualité du signal récupéré. "Qualité" reste à définir (taux d'erreur, module...). L'idéal reste de pouvoir comparer à ce qu'on obtiendrait avec du bruit sur un signal numérique. Comparer quoi ? Cela reste aussi à définir. Il est de plus compliqué de comparer une grandeur, en ayant toutes choses égales par ailleurs.

Aspects transports

- Ici, le transport est vu essentiellement sous l'aspect multiplexage. Il y a d'autres problématiques en lien avec le transport, par exemple l'influence du bruit. On pourrait comparer cette influence sur un signal modulé en amplitude par rapport à un signal modulé en fréquence, mais cela nécessite d'avoir la chaîne complète, ce n'est pas évident à faire.
- On pourrait également étudier l'atténuation du signal, notamment dans de la fibre plastique (atténuation beaucoup plus forte que pour de la fibre optique) qui est très utilisée dans l'industrie automobile, à comparer par exemple à des données constructeur. Le labo dispose aussi d'un long câble coaxial.

Bibliographie

- Travaux pratiques *Modulation et démodulation de fréquence et Translation de fréquence*, rédigés et encadrés par J.-B. Desmoulins
- Cours sur les *Systèmes bouclés*, rédigé par J.-B. Desmoulins
- Duffait
- ...
- ...