

COMPTE RENDU DE PROJET :

Mbaye Thiam

2022-2023

MODULATION/DEMODULATION NUMERIQUE

Sommaire :

I. INTRODUCTION

II. MODULATION MIA EN BANDE DE BASE

II-1. filtre d'émission

II-2. Information à transmettre: Séquence d'amplitude

II-3. Modulation en bande de base par filtrage

III. MODULATION MIA SUR FREQUENCE PORTEUSE

III-1) modulation sur fréquence porteuse

III-2) modulation avec « bande de garde »

III-3) démodulation cohérente

IV. ETUDE DE LA RESISTANCE AU BRUIT

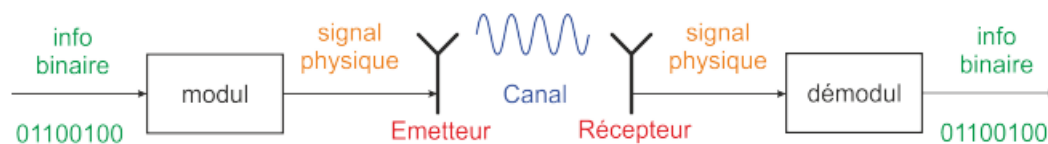
V. CONCLUSION

I. INTRODUCTION

La modulation peut être définie comme le processus par lequel le signal est transformé de sa forme originale en une forme adaptée au canal de transmission.

En télécommunications, le signal transportant une information doit passer par un moyen de transmission entre un émetteur et un récepteur. Le signal est rarement adapté à la transmission directe par le **canal de communication** choisi, hertzien, filaire, ou optique, d'où l'intérêt de la modulation.

La modulation/démodulation peuvent être schématisées ainsi :



L'objectif de ce projet est de mettre en application la modulation par impulsion d'amplitude en bande de base dans un premier, puis sur fréquence porteuse enfin, on testera la résistance du signal modulation au bruit.

II. MODULATION MIA EN BANDE DE BASE

La transmission en bande de base est une technique de transmission dans laquelle le signal est envoyé directement sur le canal après codage sans passer par une porteuse.

II-1. filtre d'émission

Le filtre d'émission est une technique d'implémentation efficace du modulateur.

On définit un filtre passe-bas comme filtre d'émission qui vérifie la condition de Nyquist, pour simplifier la démodulation.

Le filtre d'émission est réalisé à partir d'un filtre RIF passe-bas obtenu par troncature, donc la réponse impulsionnelle est un sinus cardinal centré en 0 :

$$(h[n] = 2v_0 \text{sinc}(2\pi v_0 n)).$$

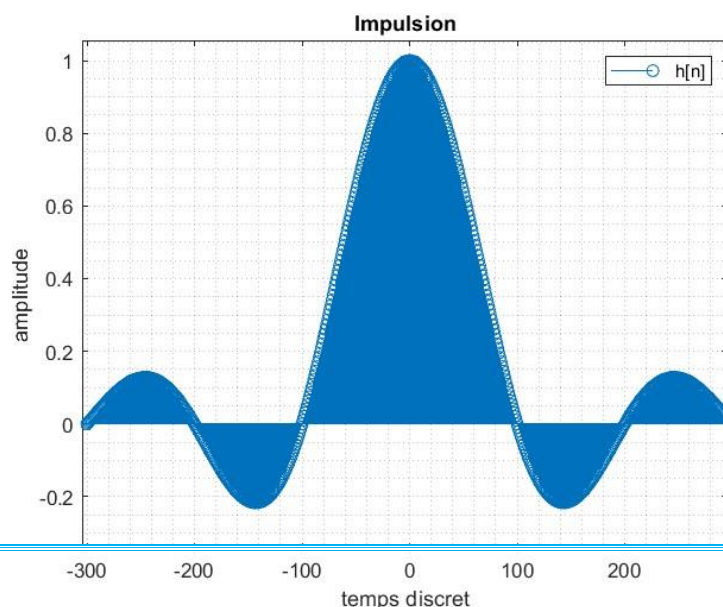
Pour respecter la condition de Nyquist, qui impose que $h[pK] = \delta[p]$ avec $p \in \{-3, 3\}$ et $K=100$ c'est-à-dire $h[-300] = h[-200] = h[-100] = h[100] = h[200] = h[300] = 0$ et $h[0] = 1$.

La période pour respecter la condition de Nyquist et avoir $\pm 3K$ échantillons, est donc $2*K$ d'où une fréquence de coupure $v_c = 1/2*K$.

Le programme Matlab pour implémenter le filtre d'émission :

```
K= 100;          %-----facteur d'echantillonnage
vc =1/(2*K) ;%-----fréquence de coupure
n_ny =[-(0:3*K),(1:3*K)]; %---discrétisation échantillons

h_ny = 2*K*vc*sinc(2*vc*(n_ny)); %---response impulsionnelle
%---On multiplie par K, pour amplifier la reponse impulsionnelle,
%---ainsi avoir un maximum égale à 1.
```



Graphiquement, on observe bien que la condition de Nyquist est bien vérifiée avec la fréquence de coupure ν_c :

$$\begin{aligned} h[-300] &= 0 = \delta[-3], & h[0] &= 1 = \delta[0], & h[300] &= 0 = \delta[3], \\ h[-200] &= 0 = \delta[-2], & h[100] &= 0 = \delta[1], & \\ h[-100] &= 0 = \delta[-1], & h[200] &= 0 = \delta[2], & \end{aligned}$$

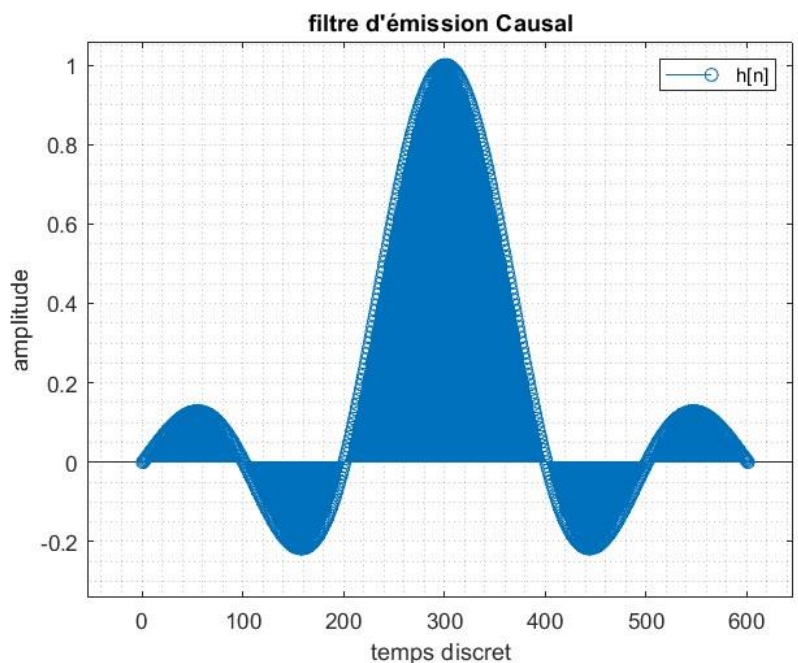
Le filtre réalisé est bien RIF, mais pas causale, donc on va retarder de $3 \cdot K$ échantillons pour le rendre causal.

```
K= 100;           %-----facteur d'echantillonnage
vc =1/(2*K) ;%-----fréquence de coupure
n=0:6*K;         %----discrétisation échantillons
h = 2*K*vc*sinc(2*vc*(n-(6*K)/2)); %---filtre d'émission
%---On a multiplié par K, pour amplifier le filtre d'émission,
%---ainsi avoir un maximum égale à 1.
% Pour appliquer le retard, on a translaté de -3*K
```

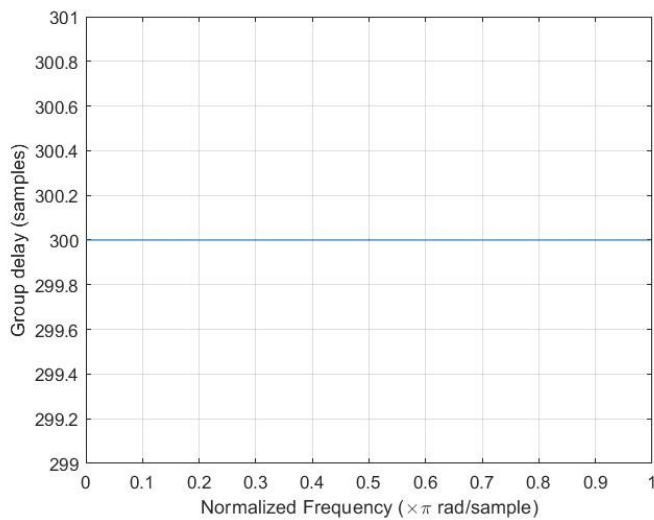
Affichage de la courbe :

```
figure()
stem(h)
title("filtre d'émission Causale")
xlabel('temps discret')
ylabel('amplitude')
legend('h[n]')
grid("minor")
```

Le filtre d'émission obtenu est bien tronqué entre 0 et $6 \cdot K$, donc RIF et causal.



La causalité du filtre a logiquement induit un retard de groupe.



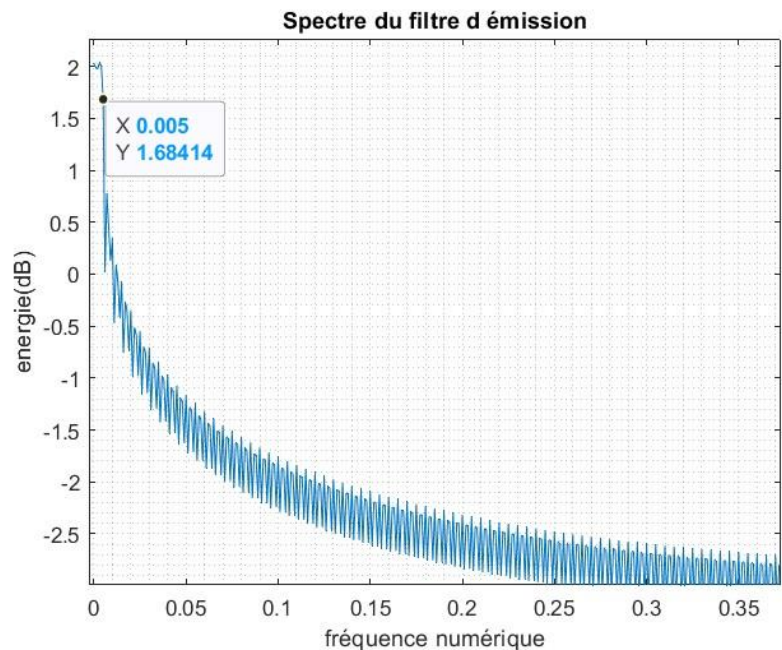
Avec la fonction Matlab **grpdelay**, on observe graphiquement un retard constant à 300.

Ce résultat est prédictible, parce que la translation effectuée pour rendre le filtre causal est de 300 échantillons.

Théoriquement la largeur occupée par la modulation :

$|0 - \nu_c|$ en fréquence (Hz),
numériquement la bande occupée est égale à **0.005Hz**

Ce résultat est observé aussi sur le spectre du filtre d'émission.

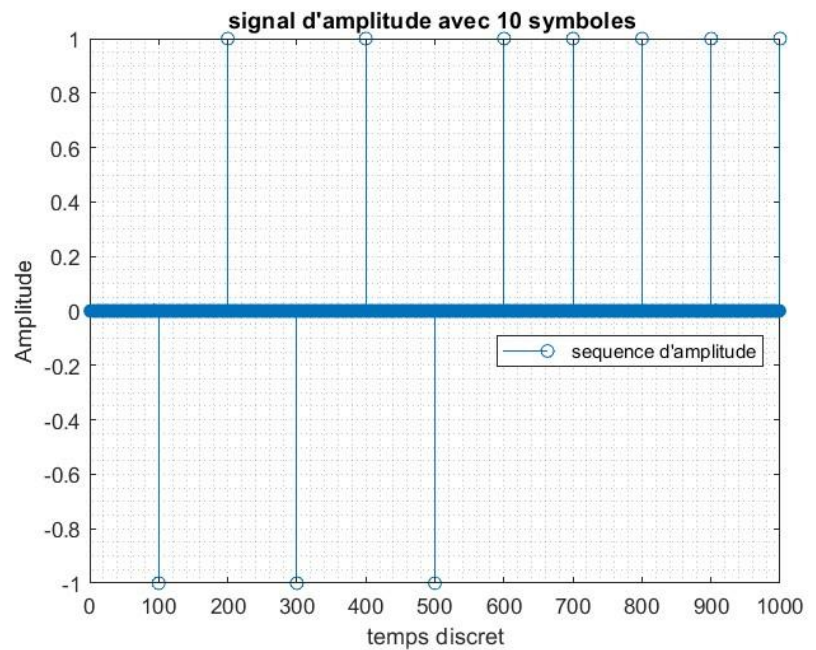


II-2. Information à transmettre : séquence d'amplitude

Le signal d'amplitude est généré par interpolation à zéro, il s'agit de sur-échantillonner la séquence d'amplitude(symboles), en espaçant les symboles d'un facteur K et entre chaque symbole, il n'y a que des valeurs nulles.

Un exemple de signal d'amplitude avec 10 symboles, en observe bien que tous les symboles sont distants les uns des autres du facteur $K(100)$.

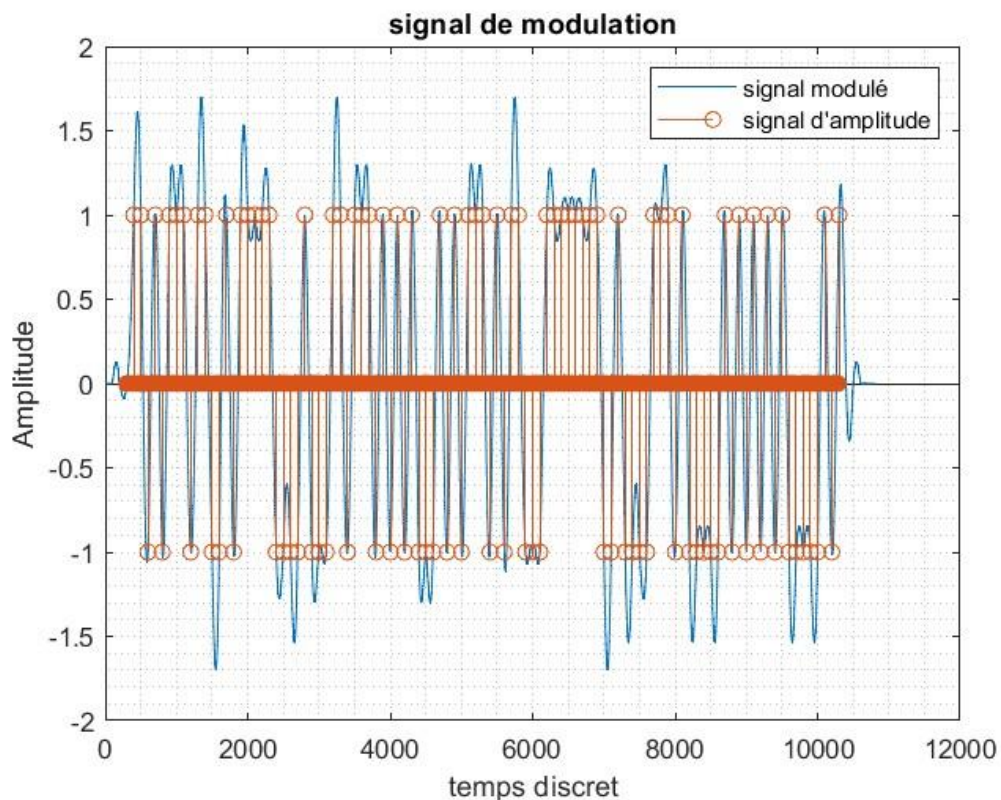
Ce signal est pseudo-aléatoire, il varie à chaque exécution.



II-3. Modulation en bande de base par filtrage.

La modulation est effectuée en filtrage du signal d'amplitude par le filtre d'émission.

On obtient ainsi le signal de modulation, mais le processus est sensible aux erreurs de calage. Donc pour respecter la condition de Nyquist : $s[\tau + kT] = a_k$, on compense le retard de groupe en décalant le signal d'amplitude du facteur K .



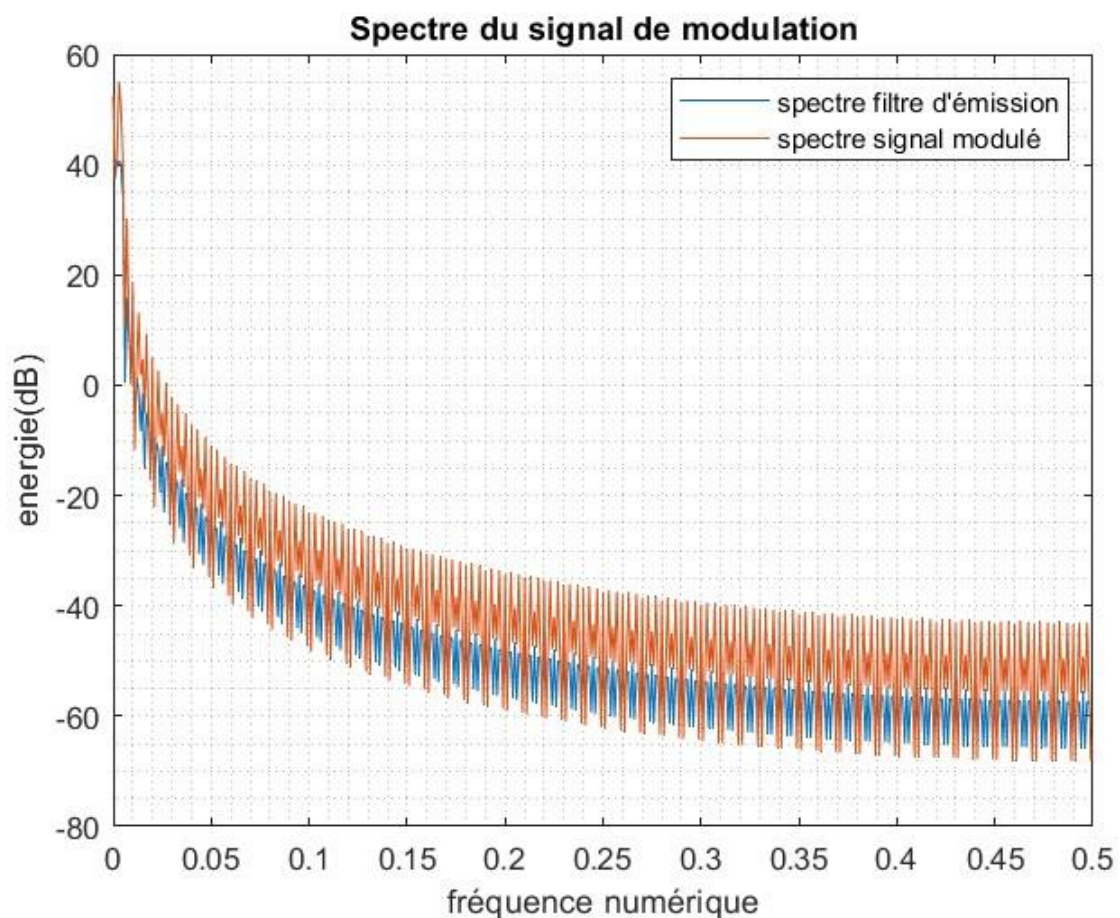
Graphiquement, la condition de Nyquist est bien respectée avec une longueur de séquence de **100 symboles**, si on démodule le signal modulé, on retrouvera la séquence d'amplitude d'avant transmission.

Cette constatation est vérifiée en calculant le taux d'erreur après échantillonnage du signal modulé. (le taux d'erreur est le nombre d'erreurs calculé en comparant la séquence du signal échantillonné par la séquence de symboles, le tout sur la longueur de la séquence de symboles.)

Par vérification, on a calculé le taux d'erreur avec une longueur de séquence de **10^4** , on retrouve sans surprise un taux de **0%**,

```
taux_error_BandeBase =  
0
```

De même, on constate que le spectre du signal modulé correspond approximativement à celui du filtre d'émission. Ce phénomène peut être justifié par le fait que la largeur de la bande de fréquence est très étroite.



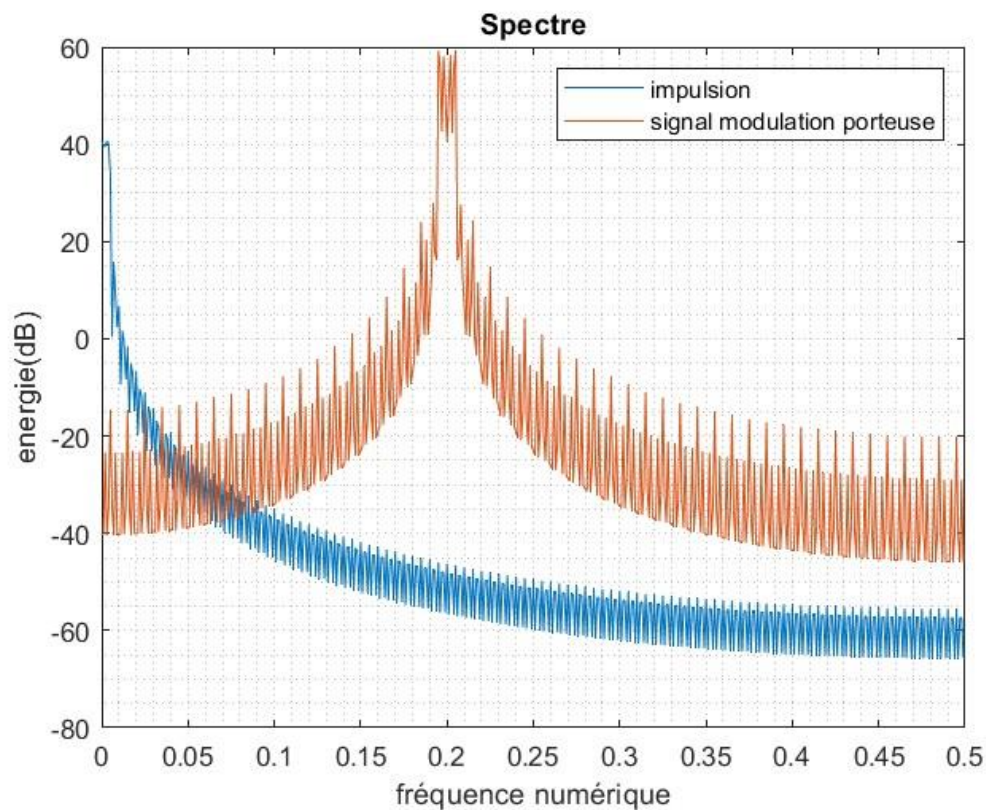
III-1) modulation sur fréquence porteuse

La modulation d'amplitude sur fréquence porteuse est une technique de modulation qui consiste à multiplier le signal à moduler par un signal de **fréquence** plus élevée (porteuse) :

$$\tilde{s}[n] = s[n]\cos(2\pi\nu_p n)$$

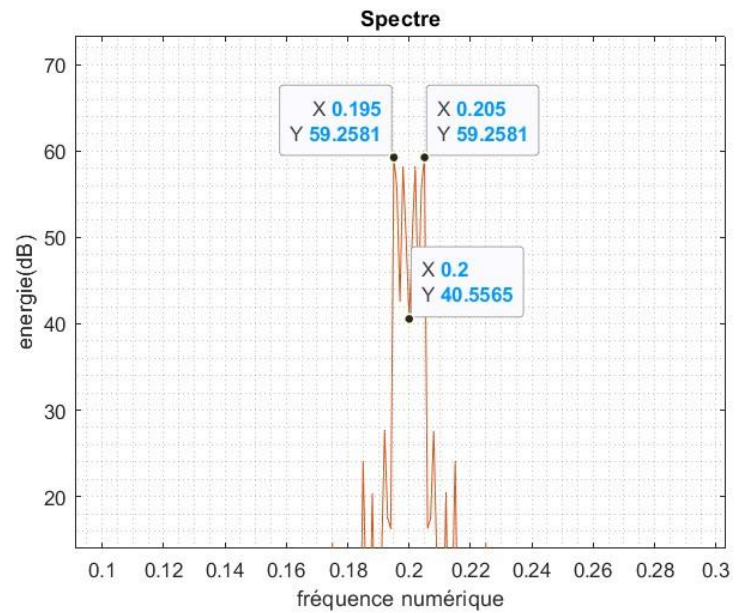
avec ν_p la fréquence de porteuse

Elle consiste à faire varier l'**amplitude** du **signal porteur**, en fonction du signal modulant de plus **basse fréquence**, qui contient l'information à transmettre.



La modulation sur fréquence porteuse, a bien translaté le spectre du signal modulé de $-\nu_p$. Le spectre correspond approximativement à la RF du filtre d'émission vers les hautes fréquences.

On voit bien la fréquence porteuse, les fréquence $\nu_p + \nu_c$ et $\nu_p - \nu_c$, qui délimite la bande de fréquence passante donc la largeur est $|2 * \nu_c|$

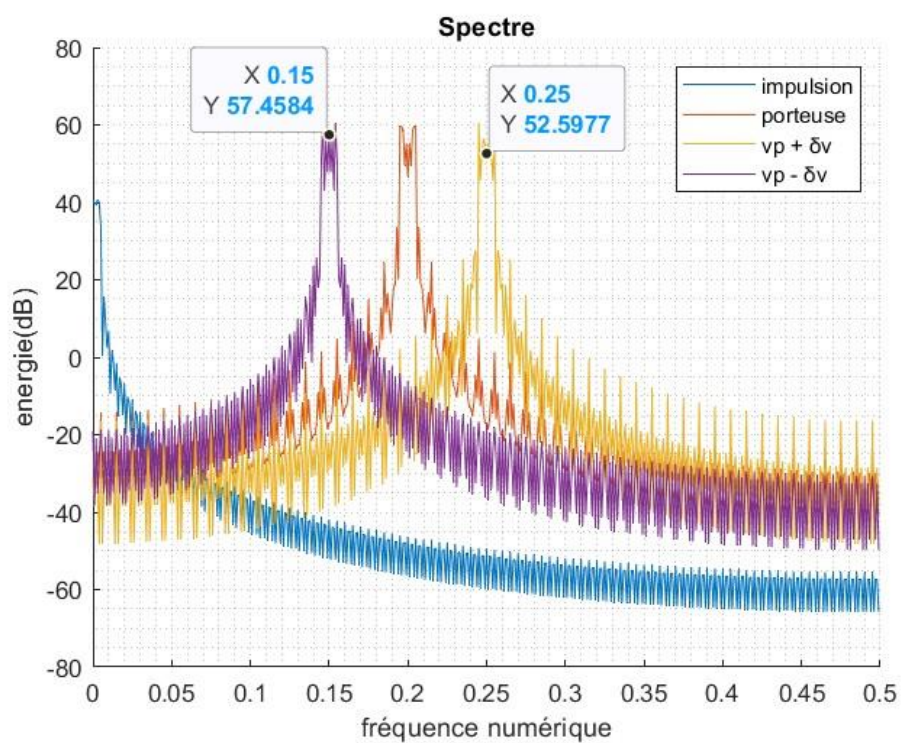


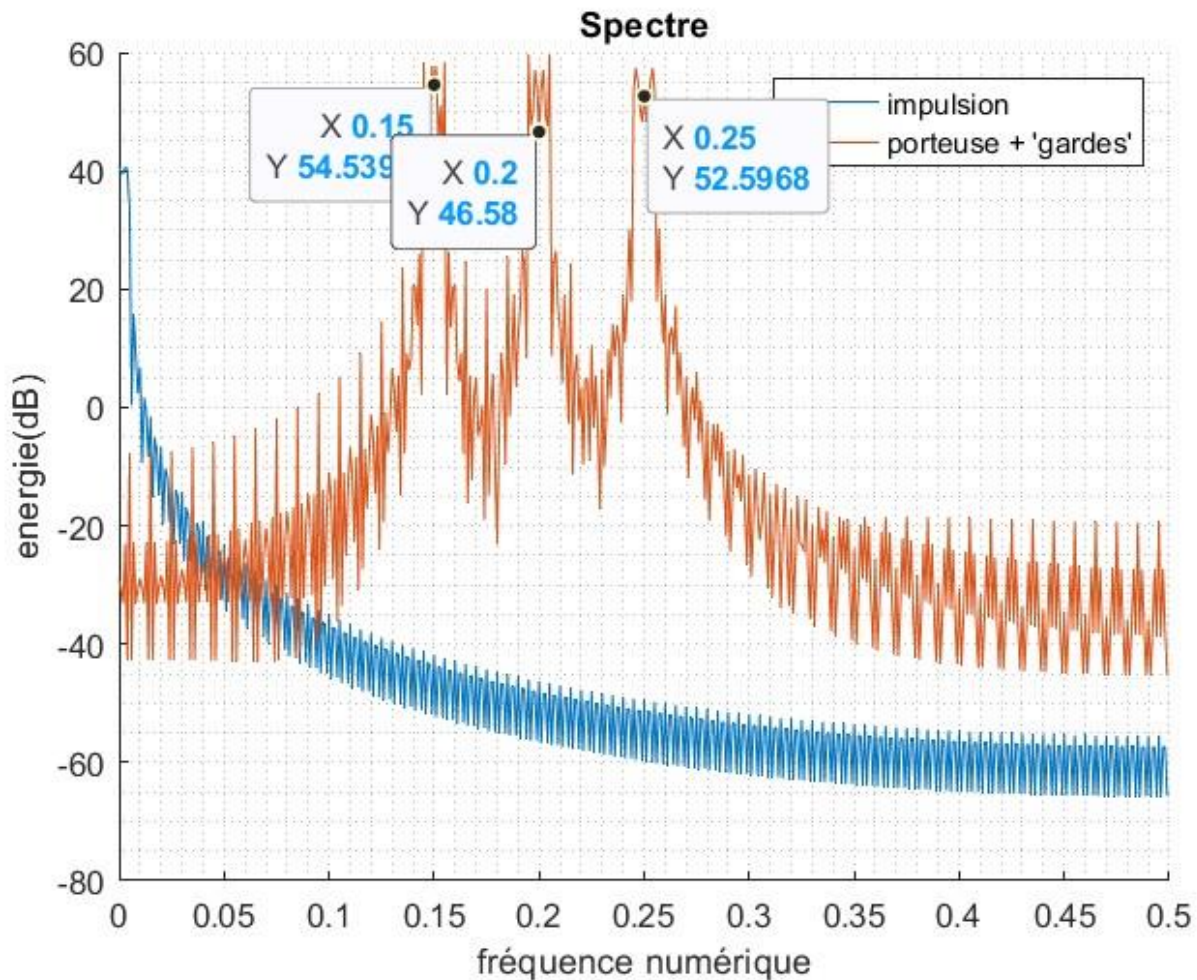
III-2) modulation avec « bande de garde »

On construit 2 autres signaux porteurs de fréquence respective $\nu_p + \delta\nu$ et $\nu_p - \delta\nu$ qui joueront le rôle de « bande de garde »

Les 2 signaux de garde sont bien translatés respectivement de $\nu_p + \delta\nu$ et $\nu_p - \delta\nu$.

La forme des spectres est globalement la même.





En additionnant les 3 signaux porteurs, le spectre résultant est similaire à celui d'avant, on retrouve les mêmes pics et l'allure est globalement la même. Ce qui est logique vu qu'on a additionné des sinus, et dans le domaine fréquentiel, toutes les fréquences peuvent être séparés.

III-3) démodulation cohérente

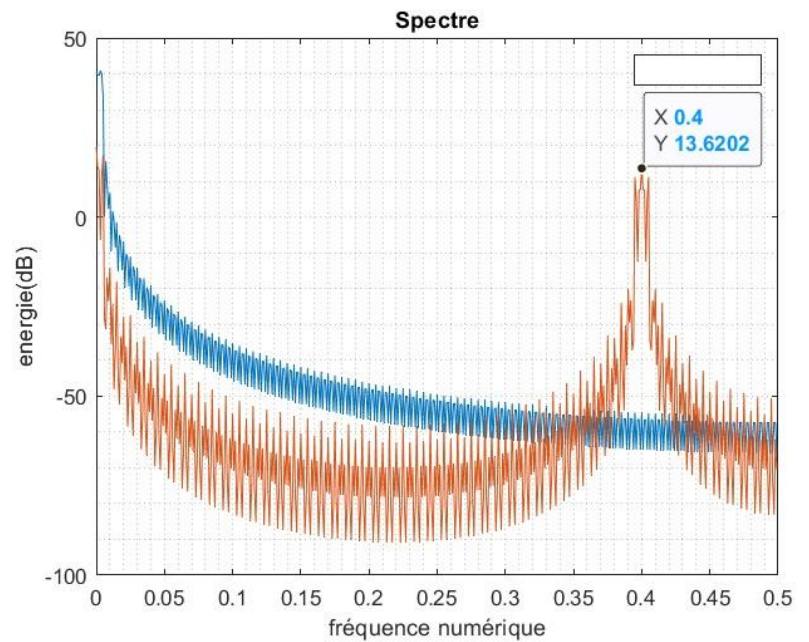
C'est une technique de démodulation qui consiste à isoler la fréquence porteuse et grâce à un filtre passe-bas de largeur la bande de fréquence, on retrouvera le signal d'avant modulation ainsi, on peut décoder l'information reçue par le récepteur.

Pour isoler la fréquence porteuse, on remultiplie le signal modulé par la porteuse.

$$S_demol[n] = s[n] * \cos(2\pi\nu_p n)$$

avec $s[n]$: le signal modulé en bande de base

Isolation de la fréquence porteuse, qui se traduit par une translation du spectre du signal modulé de $-2*v_p$. Ainsi, on peut facilement récupérer le signal d'information.

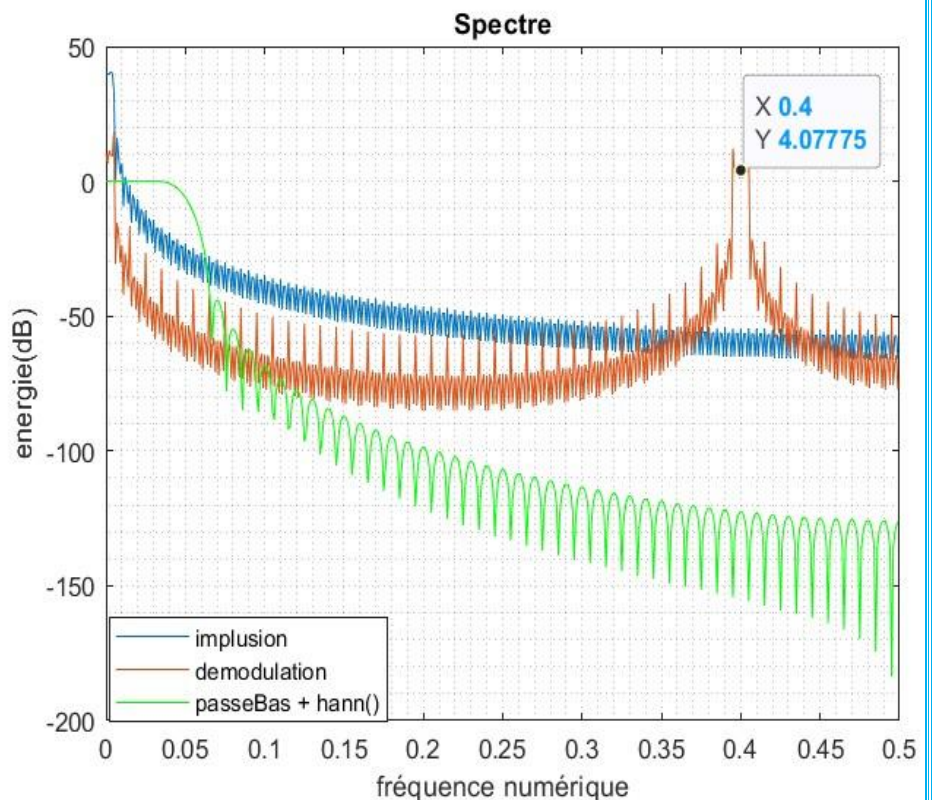


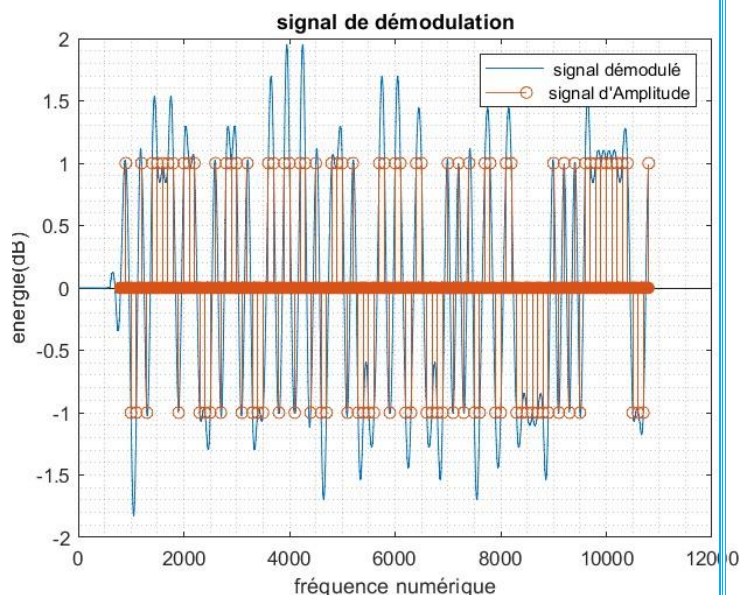
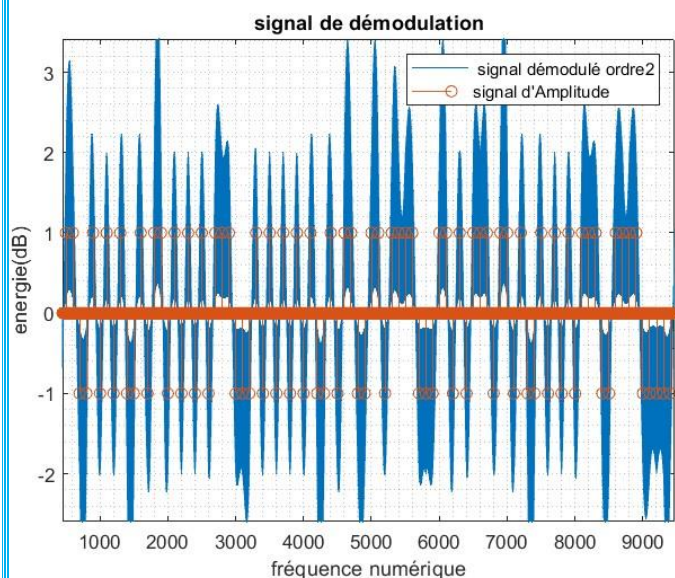
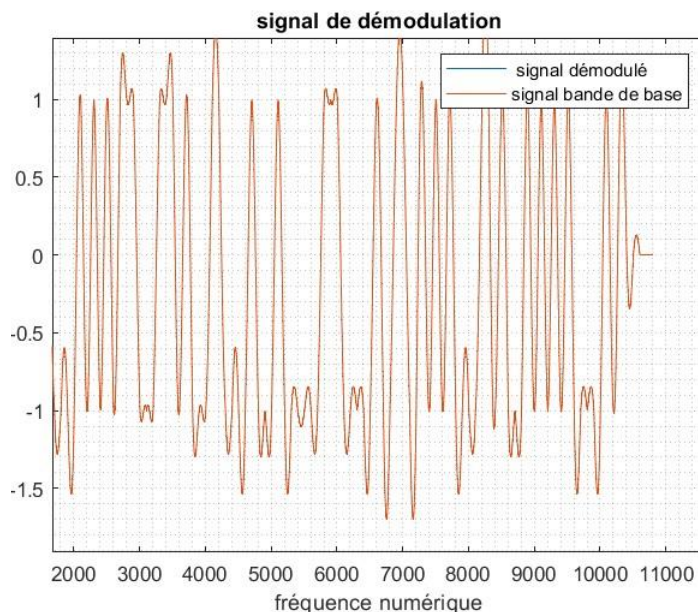
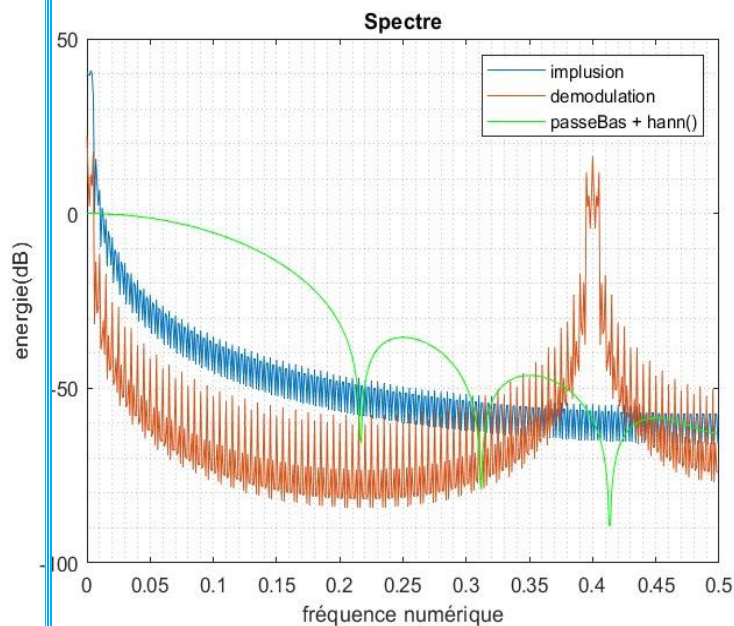
Pour éliminer la fréquence porteuse dans le signal et récupérer le signal avant modulation par porteuse, on utilise un filtre passe-bas de fréquence de coupure la largeur de la « bande de garde » (théoriquement) :

$$v_0 = 2 * \delta v$$

Graphiquement, on voit que la double fréquence porteuse est bien isolée dans la bande coupée.

En plus, le filtre ne doit pas obligatoirement être raide, la bande de transition pourrait être plus large sans que le filtre ne laisse passer la fréquence porteuse. Ce qui est très bénéfique vu que l'ordre peut être très bas sans que l'efficacité du filtre ne soit vraiment impactée (bruit minime dans ce cas). En plus, le retard de groupe sera infime.





```
taux_error_demod =
0
```

Après plusieurs tentatives, on constate qu'avec un filtre d'ordre **2**, on a une démodulation **sans erreur** (mais si le signal de sortie présente d'autres fréquences (bruit) en plus de celle en bande de base). En calculant le taux d'erreur par comparaison du signal de démodulation échantillonné par rapport au signal d'amplitude, on trouve 0%.

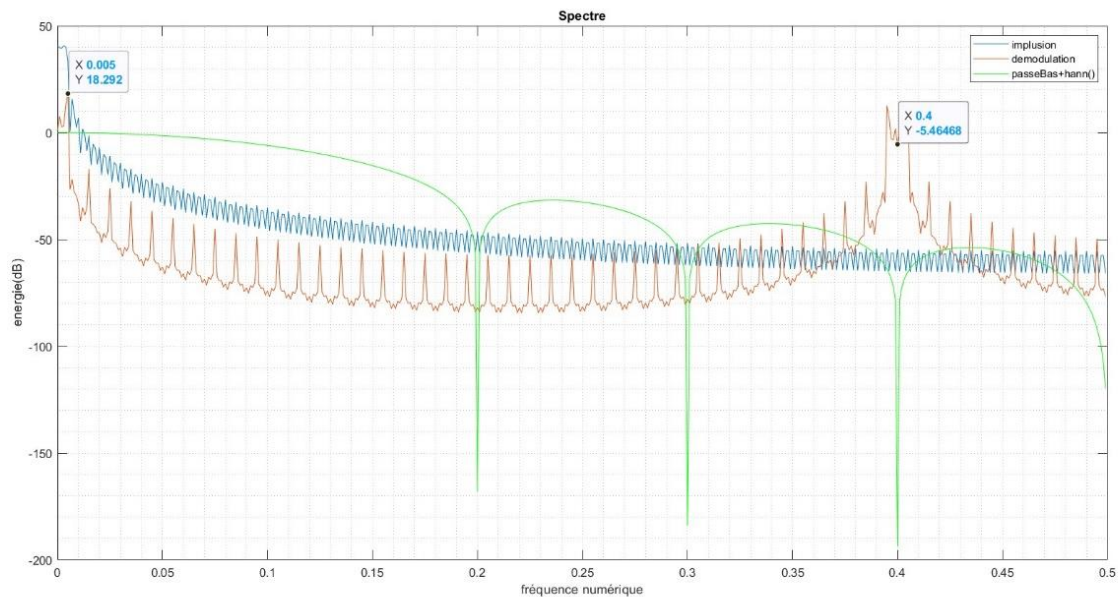
Le signal de démodulation se superpose parfaitement sur le signal en bande de base après compensation du retard de groupe, à partir **d'ordre 10 du filtre**.

On peut dire que l'ordre minimal pour une démodulation sans erreur est : **2**

VARIATION DE $\delta\nu$.

On constate qu'en baissant la valeur de $\delta\nu$, la démodulation présente des erreurs si l'ordre du filtre est élevé.

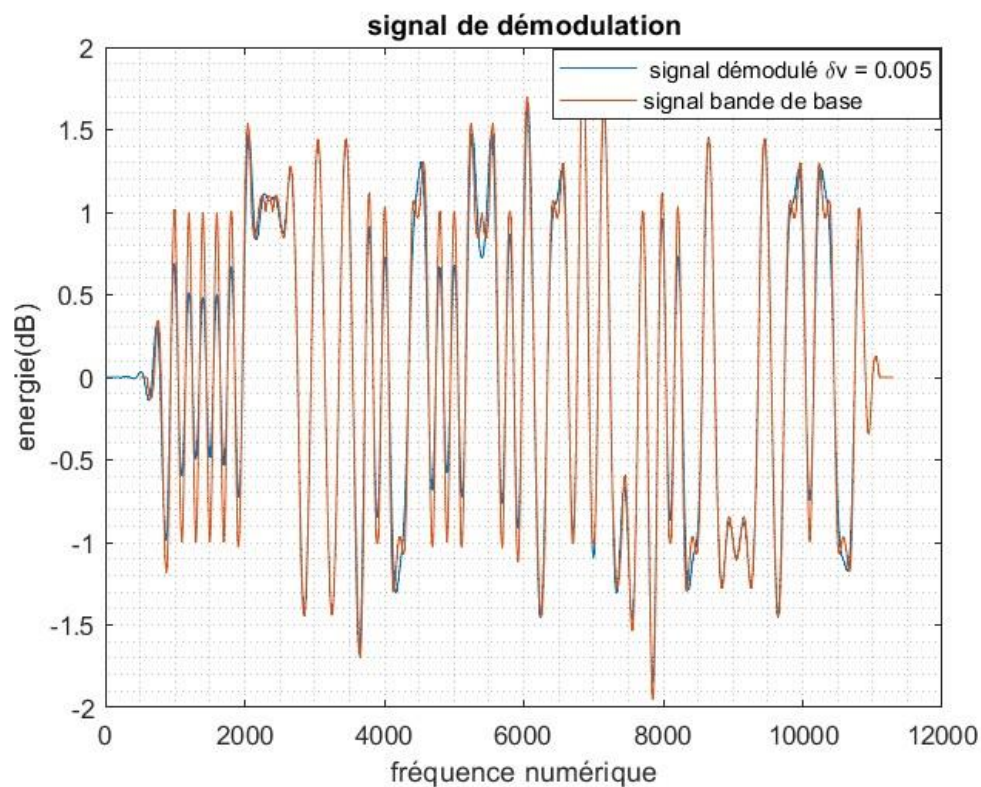
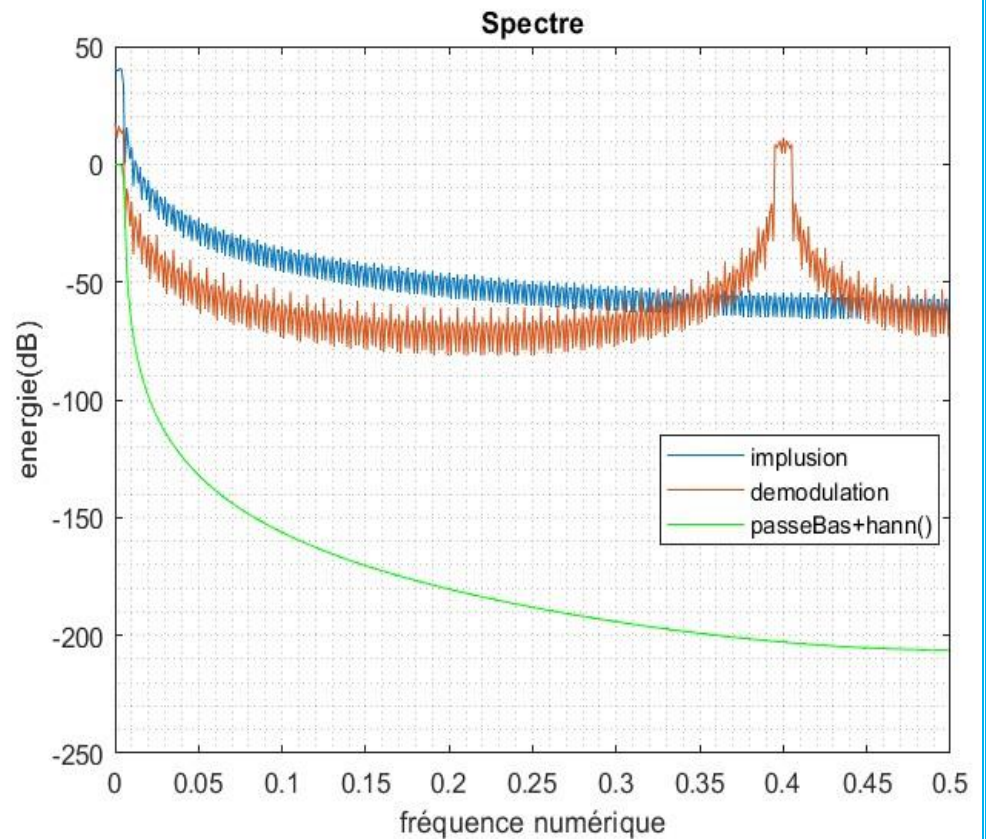
Si on baisse $\delta\nu$, et que l'ordre du filtre est assez bas, il n'y a aucun changement (le signal démodulé superpose au signal de bande de base). La largeur de la bande de transition permet de laisser passer la fréquence du signal de bande de base.



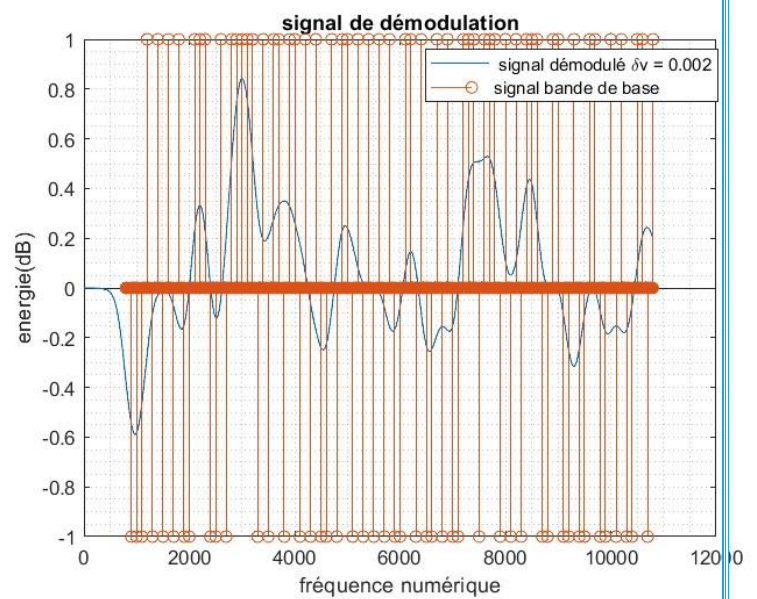
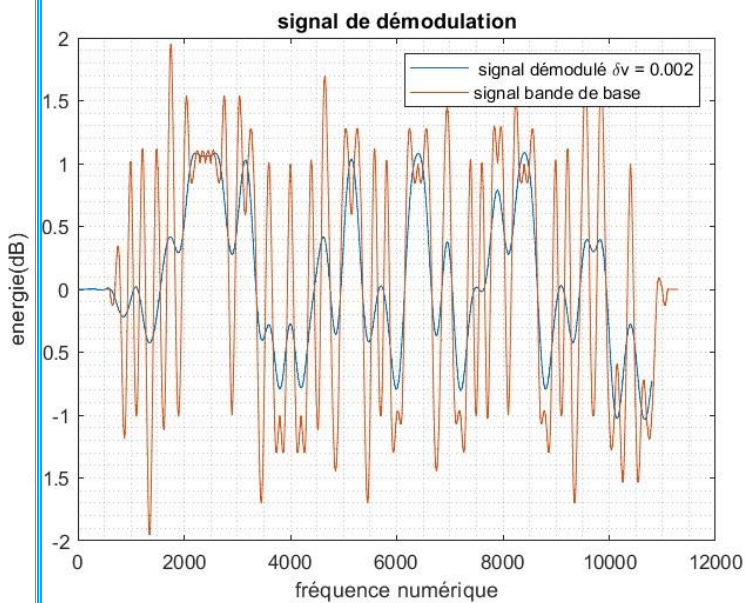
L'objectif de ce filtre est de laisser passer la fréquence d'émission tout en éliminant la fréquence porteuse. Dans ce projet la fréquence d'émission et la « double fréquence porteuse $2 * \nu_p$ » sont nettement distantes. C'est pourquoi, on peut se permettre de choisir un filtre avec une bande de transition large(ordre minime) et obtenir le résultat escompté.

Par contre, si on s'approche de la fréquence d'émission ν_0 (0.005) et que l'ordre filtre est élevé **100**(filtre raide), on commence à observer des perturbations sur le signal démodulé.

Les variations d'amplitude et de fréquence sur le signal démodulé, s'expliquent par le fait que la fréquence du signal de bande de base est limitée dans la bande de transition, une partie de son énergie est filtrée.



Si on dépasse la fréquence ν_0 avec un **filtre raide**, la démodulation n'est plus efficace, le signal démodulé est nettement distinct du signal de bande de base



Après démodulation du signal avec porteuse, on trouve sans surprise des erreurs de démodulation en comparant le signal de démodulation avec le signal d'amplitude.

Pour un $\delta\nu = 0.002$, on trouve :

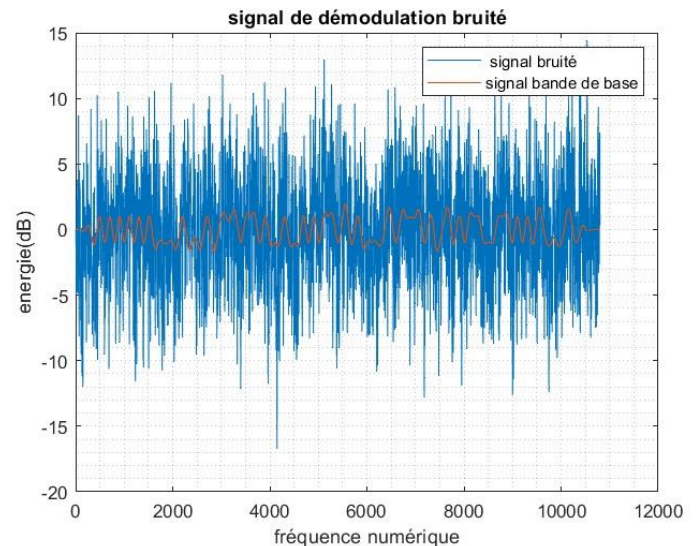
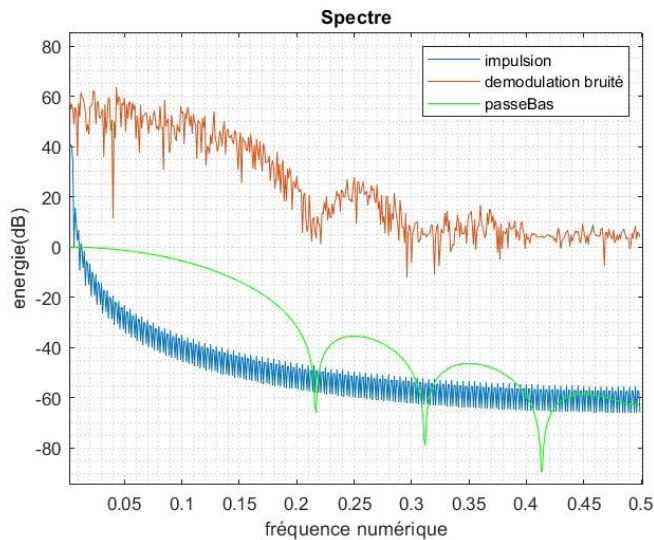
taux_error_demod =
37

Pour assurer un filtrage efficace, il faut que ν_0 soit assez distante de ν_c (fréquence du signal en bande de base).

Donc la valeur limite de $\delta\nu$ est ν_0 .

IV. ETUDE DE LA RESISTANCE AU BRUIT

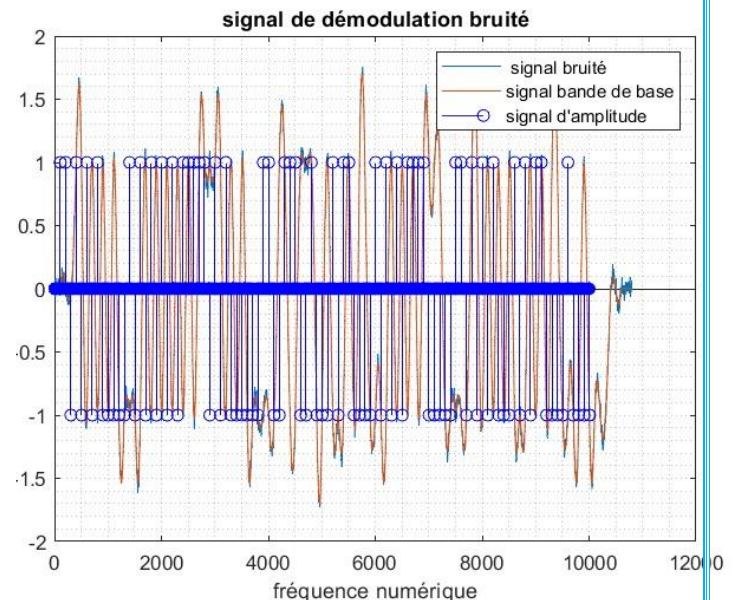
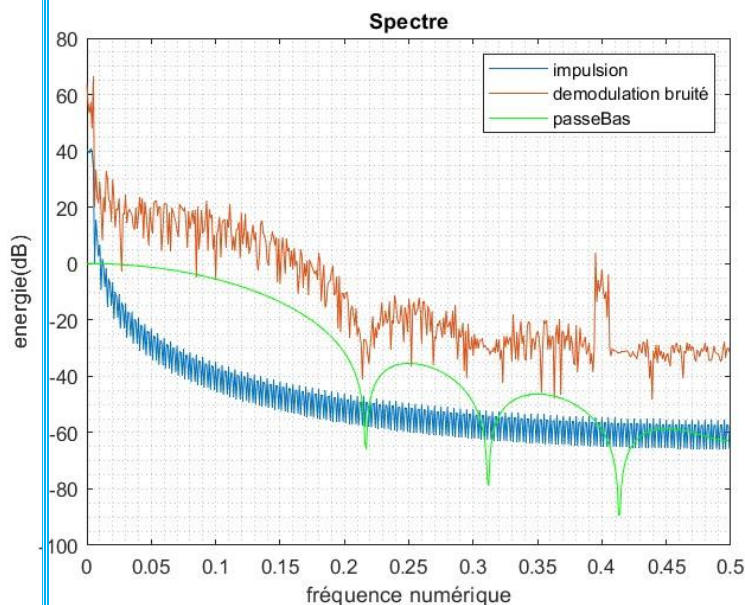
On simule la résistance au bruit (bruit blanc gaussien centré de variance σ^2) de la démodulation avec un filtre passe-bas d'ordre 10, de fréquence de coupure $2 * \delta\nu$.



On remarque que, avec $\sigma = 0.05$ et un filtre d'ordre 10, le signal de démodulation, présente malgré le filtrage du bruit, beaucoup de bruit encore. Cela est logique, vu que l'ordre du filtre est bas.

Mais le taux d'erreur est nul, ce qui est très surprenant, le signal de sortie est nettement différent du signal de bande de base.

Échantillonner le signal de démodulation en convertissant en 1 toutes les valeurs supérieures à 0, et en -1 celles qui sont inférieures à 0, n'accordent pas un traitement particulier aux fréquences «parasites », donc en comparant cette séquence au signal d'amplitude, on trouve rarement des erreurs, le signal bruité est dense.



On observe sur le spectre que l'amplitude des « fréquences de bruit » diminue nettement avec $\sigma=0.0005$, c'est pourquoi le signal de démodulation est assez identique au signal de bande de base, avec un filtre d'ordre 10.

En plus, le taux d'erreur est nul :

```
taux_error_demod_bruit =  
0
```

Pour obtenir une démodulation quasi-parfaite, avec ces conditions (fréquence de coupure $2 * \delta\nu$, ordre du filtre 10), il faut que l'amplitude du bruit σ soit égale à **0.0005**.

Le bruit modifie le spectre du signal à démoduler, il amplifie les fréquences « parasites » en fonction de la valeur de σ , ce qui complique le filtrage, parce que, pour enlever tous ces bruits, il faut un filtre très raide à la bonne fréquence de coupure.

v. CONCLUSION

La modulation/démodulation est une technique très importante en télécommunication, elle permet la communication entre plusieurs personnes simultanément, en assurant une transmission de haute qualité, tout en évitant le chevauchement des signaux.

Ce Projet, nous a permis d'appliquer la technique de modulation/démodulation d'amplitude, de comprendre l'efficacité des méthodes et de voir aussi les limites de ce modèle de modulation notamment avec l'introduction de bruit dans le canal de transmission.