

inp_n7.png

Réalisation d'un modem de fréquence selon la
recommandation V21 de l'Union Internationale des
Télécommunications (UIT)

Ayoub Bouchama
Oussama ElGuerraoui

2022-2023

Table des matières

1	Introduction	4
2	Modem de fréquence	4
2.1	Construction du signal modulé en fréquence	4
2.1.1	Génération du signal NRZ	5
2.1.2	Génération du signal modulé en fréquence	5
3	Canal de transmission à bruit additif, blanc et Gaussien	7
4	Démodulation par filtrage	7
4.1	Synthèse du filtre passe-bas	8
4.2	Synthèse du filtre passe-haut	8
4.3	Résultats obtenus avec un ordre des filtres de 61	8
4.4	Modification de l'ordre des filtres	8
4.5	Utilisation des fréquences de la recommandation V21	8
5	Démodulateur de fréquence adapté à la norme V21	9
5.1	Contexte de synchronisation idéale	9
5.1.1	Principe de fonctionnement de ce récepteur	9
5.1.2	Résultats obtenus	9
5.2	Gestion d'une erreur de synchronisation de phase porteuse	9
5.2.1	Impact d'une erreur de phase porteuse sur le modem implanté précédemment	10
5.2.2	Principe de fonctionnement de cette nouvelle version du modem de fréquence	10
5.2.3	Résultats obtenus	10
6	Conclusion	11
7	Références	11

Table des figures

1	Signal modulé en fréquence	4
2	Démodulation par filtrage.	7
3	Démodulation FSK. Synchronisation supposée idéale.	9
4	Démodulation FSK - Gestion d'une erreur de phase porteuse.	10

1 Introduction

Le projet consiste en la réalisation d'un modem de fréquence, selon la recommandation V21 de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT). Un modem (acronyme de modulateur/démodulateur) est un dispositif utilisé pour transformer une information numérique en un signal pouvant être transmis sur le support physique de communication entre l'émetteur et le récepteur (modulation), et pour retrouver l'information binaire à partir du signal altéré par le lien physique de communication (démodulation). Le modem à implanter dans ce projet sera utilisé sur la ligne téléphonique, avec un débit maximal de 300 bits par seconde (également exprimé en bauds). La technique de transmission utilisée est la modulation de fréquence numérique, qui est encore utilisée dans de nombreux systèmes de transmission actuels, tels que l'internet des objets (technologie LoRa), le Bluetooth ou la télémessure/télécommande par satellite. Le modem V21 fonctionne en mode duplex et simule la voie de transmission n°1 (appel). La première étape du projet consiste à créer le signal modulé en fréquence à partir d'un fichier d'information binaire. Ensuite, à partir d'un signal reçu altéré par un canal à bruit additif blanc et gaussien (AWGN), il faudra mettre en place le modem de réception permettant de retrouver l'information binaire. Plusieurs versions du récepteur seront implantées : une première version procédera par filtrage, une seconde utilisera la méthode de détection de corrélation de moyenne et une troisième mettra en œuvre une détection de corrélation de maximal. Enfin, la dernière étape consistera à évaluer la qualité de transmission obtenue en comparant l'information binaire transmise à celle reçue.

2 Modem de fréquence

2.1 Construction du signal modulé en fréquence

La première étape du projet consiste à réaliser la modulation de fréquence, i.e. transformer l'information binaire à transmettre en un signal modulé en fréquence (exemple sur la figure 1).

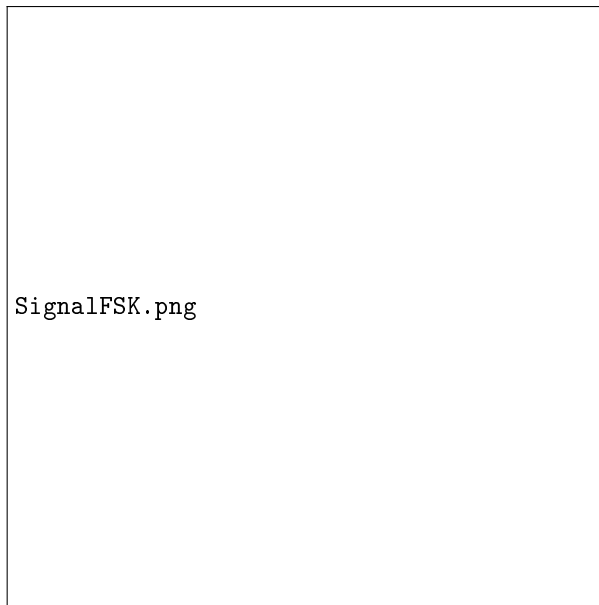


FIGURE 1 – Signal modulé en fréquence

Le signal modulé en fréquence $x(t)$ est généré de la manière suivante :

$$x(t) = (1 - NRZ(t)) \times \cos(2\pi F_0 t + \phi_0) + NRZ(t) \times \cos(2\pi F_1 t + \phi_1) \quad (1)$$

où $NRZ(t)$ est un signal de type NRZ polaire formé à partir de la suite de bits à transmettre en codant les 0 et les 1 par des niveaux 0 et 1 de durée T_s secondes. ϕ_0 et ϕ_1 sont des variables aléatoires indépendantes uniformément réparties sur $[0, 2\pi]$ qui peuvent être obtenues sous matlab en utilisant $rand*2*pi$.

2.1.1 Génération du signal NRZ

- Le signal NRZ (Non Return to Zero) est un type de signal numérique utilisé dans les communications de données pour représenter des bits binaires sous forme de tension électrique. Pour générer ce signal, nous utilisons la fonction `randi()` de Matlab pour générer un vecteur de bits aléatoires de longueur `nbit`. Nous utilisons ensuite la fonction `kron()` pour étendre chaque bit sur `Ns` échantillons consécutifs, de sorte que chaque bit du signal NRZ est représenté par un segment de `Ns` échantillons consécutifs de la même valeur
- Une fois le signal NRZ généré, nous pouvons l'afficher dans une échelle temporelle en utilisant la fonction `plot()` de Matlab. Nous pouvons également calculer et afficher sa densité spectrale en utilisant la fonction `fft()` pour calculer sa transformée de Fourier, puis en utilisant la fonction `abs()` pour obtenir sa magnitude et en la mettant au carré pour obtenir sa densité spectrale.
- Enfin, nous pouvons également calculer et afficher la densité spectrale du filtre idéal NRZ en utilisant le vecteur `y` de zéros, en mettant à 1 le coefficient correspondant à la fréquence 0 (dirac) et en utilisant la fonction `sinc()` pour définir la densité spectrale du filtre. Nous pouvons ensuite afficher les densités spectrales du signal NRZ et du filtre idéal NRZ sur une échelle logarithmique en utilisant la fonction `semilogy()`

2.1.2 Génération du signal modulé en fréquence

- Génération des porteuses : afin de moduler le signal NRZ, nous avons généré deux porteuses sinusoïdales de fréquences $F_0 = 6000$ Hz et $F_1 = 2000$ Hz. Nous avons également attribué une phase aléatoire à chacune de ces porteuses.
- Modulation du signal NRZ : nous avons modulé le signal NRZ en multipliant chaque bit par la porteuse correspondante (`s0` pour les bits de valeur 0 et `s1` pour les bits de valeur 1). Le résultat de cette opération est un signal modulé en fréquence, que nous avons appelé `x`.
- Affichage et analyse du signal modulé : nous avons affiché le signal `x` dans une échelle temporelle et calculé sa densité spectrale. Nous avons constaté que la densité spectrale du signal `x` présente des pics de puissance autour des fréquences F_0 et F_1 , ce qui indique que le signal NRZ a bien été modulé en utilisant ces deux porteuses.
- Le calcul de la densité spectrale :

$$x(t) = (1 - NRZ(t)) \cos(2\pi F_0 t + \phi_0) + NRZ(t) \cos(2\pi F_1 t + \phi_1)$$

Comme ϕ_0 et ϕ_1 sont des variables aléatoires indépendantes uniformément réparties sur $[0, 2\pi]$, NRZ signal aléatoire centre.

Alors :

$$R_x(\tau) = E[x(t) x^*(t - \tau)]$$

Donc :

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= E[(1 - NRZ(t)) \cos(2\pi F_0 t + \phi_0) + NRZ(t) \cos(2\pi F_1 t + \phi_1)] \\ &= E[(1 - NRZ(t - \tau)) \cos(2\pi F_0(t - \tau) + \phi_0) + NRZ(t - \tau) \cos(2\pi F_1(t - \tau) + \phi_1)] \\ &= E[(1 - NRZ(t)) (1 - NRZ(t - \tau))] E[\cos(2\pi F_0 t + \phi_0) \cos(2\pi F_0(t - \tau) + \phi_0)] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& E[((1 - NRZ(t)) NRZ(t - \tau)) E[\cos(2\pi F_0 t + \phi_0) \cos(2\pi F_1(t - \tau) + \phi_1)]] + \\
& E[(NRZ(t) (1 - NRZ(t - \tau))] E[\cos(2\pi F_1 t + \phi_1) \cos(2\pi F_0(t - \tau) + \phi_0)] + \\
& E[NRZ(t) NRZ(t - \tau)] E[\cos(2\pi F_1 t + \phi_1) \cos(2\pi F_1(t - \tau) + \phi_1)] \\
& = E[\cos(2\pi F_0 t + \phi_0) \cos(2\pi F_0(t - \tau) + \phi_0)] + E[NRZ(t) NRZ(t - \tau)] \\
& E[\cos(2\pi F_0 t + \phi_0) \cos(2\pi F_0(t - \tau) + \phi_0)] + E[(NRZ(t) NRZ(t - \tau)) E[\cos(2\pi F_1 t + \phi_1) \\
& E[\cos(2\pi F_0(t - \tau) + \phi_0)] + E[NRZ(t) NRZ(t - \tau)] E[\cos(2\pi F_0 t + \phi_0)] E[\cos(2\pi F_1(t - \tau) + \phi_1)] + \\
& E[NRZ(t) NRZ(t - \tau)] E[\cos(2\pi F_1 t + \phi_1) \cos(2\pi F_1(t - \tau) + \phi_1)] \\
R_x(\tau) &= \frac{R_{NRZ}(\tau)}{2} [\cos(2\pi F_0 \tau) + \cos(2\pi F_1 \tau)]
\end{aligned}$$

car :

$$\begin{aligned}
E[\cos(2\pi F_0 t + \phi_0)] &= E[\cos(2\pi F_1 t + \phi_1)] = 0 \\
E[\cos(2\pi F_0 t + \phi_0) \cos(2\pi F_0(t - \tau) + \phi_0)] &= \cos(2\pi F_0 \tau) \\
E[\cos(2\pi F_1 t + \phi_0) \cos(2\pi F_1(t - \tau) + \phi_0)] &= \cos(2\pi F_1 \tau)
\end{aligned}$$

La densité spectrale de puissance :

$$\begin{aligned}
S_x(f) &= TF(R_x(\tau)) \\
&= \frac{1}{2} TF(R_{NRZ}(\tau)) * TF(\cos(2\pi F_0 \tau) + \cos(2\pi F_1 \tau)) \\
&= \frac{1}{2} S_{NRZ}(f) * (\delta(f - f_1) + \delta(f - f_0)) \\
S_x(f) &= \frac{1}{2} (S_{NRZ}(f - f_0) + S_{NRZ}(f - f_1))
\end{aligned}$$

3 Canal de transmission à bruit additif, blanc et Gaussien

Nous allons considérer que le canal de propagation ajoute au signal émis un bruit que l'on suppose blanc et Gaussien et qui modélise les perturbations introduites.

La puissance du bruit Gaussien à ajouter devra être déduite du rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) souhaité pour la transmission donné en dB :

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_x}{P_b}$$

où P_x représente la puissance du signal modulé en fréquence et P_b la puissance du bruit ajouté.

4 Démodulation par filtrage

La figure 2 présente le récepteur implanté pour retrouver, à partir du signal modulé en fréquence bruité, le message binaire envoyé.

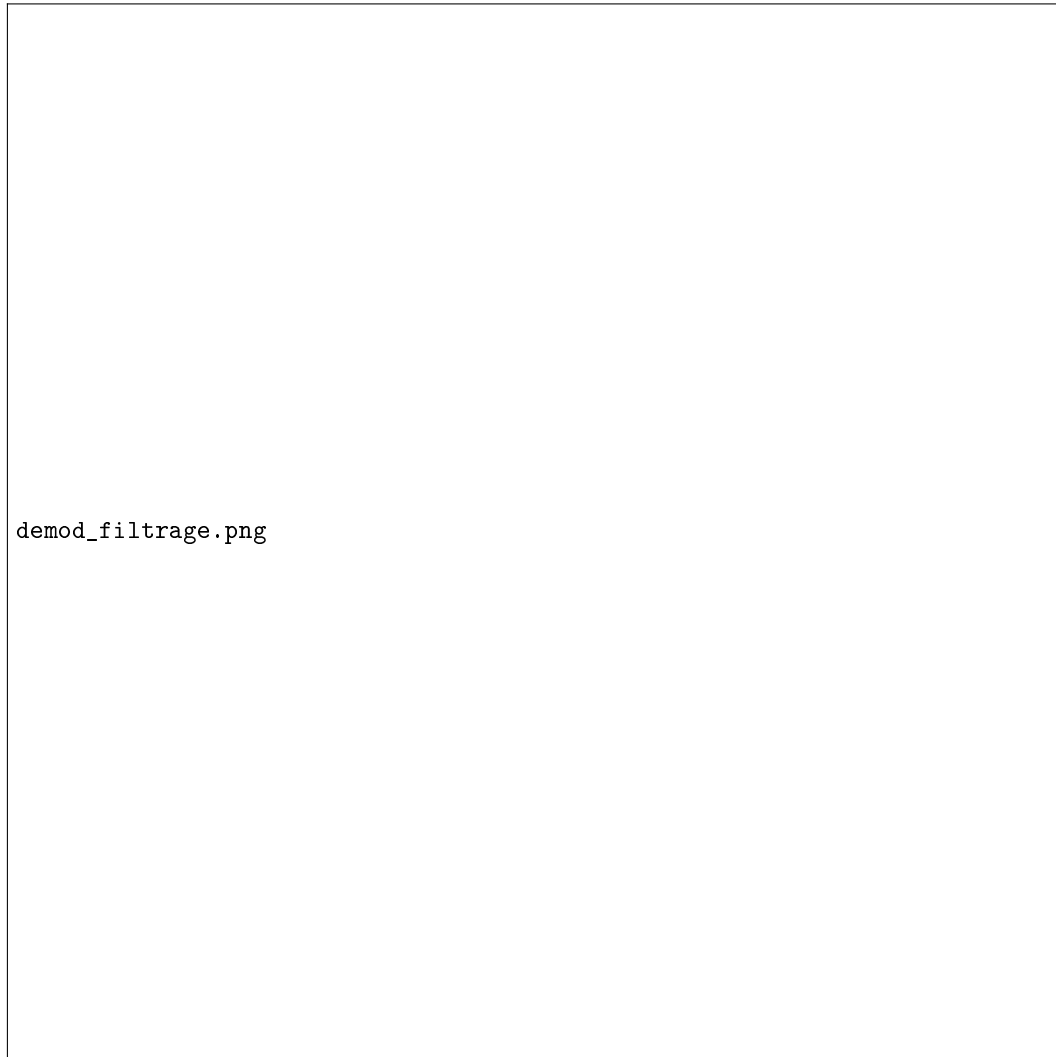


FIGURE 2 – Démodulation par filtrage.

Un filtre passe-bas permet de filtrer les morceaux de cosinus à la fréquence $F_0 = 6000\text{Hz}$, tandis qu'un filtre passe-haut permet de filtrer les morceaux de cosinus à la fréquence $F_1 = 2000\text{Hz}$. Une

détection d'énergie réalisée tous les T_s secondes permet de récupérer, à partir des signaux filtrés, les bits 0 et 1 transmis.

4.1 Synthèse du filtre passe-bas

La fréquence de coupure du filtre passe-bas est définie comme la fréquence moyenne entre les fréquences de la porteuse 0 et de la porteuse 1, c'est-à-dire $(F_0 + F_1) / 2$.

Un vecteur k compris entre $-N$ et N est créé, où N est un entier déterminant la longueur du filtre. L'intervalle de temps entre chaque échantillon du signal filtré est calculé en divisant l'inverse de la fréquence d'échantillonnage par le nombre d'échantillons.

La fréquence normalisée du filtre passe-bas est calculée en divisant la fréquence de coupure par la fréquence d'échantillonnage.

Le vecteur de la réponse impulsionnelle du filtre passe-bas est créé en utilisant la fonction sinc et en multipliant chaque élément par $2 * f\text{-tilde}$.

Un vecteur de temps compris entre $-N * T_e$ et $N * T_e$ est créé en utilisant l'intervalle de temps calculé précédemment.

La réponse impulsionnelle du filtre passe-bas est tracée sur un graphique en utilisant le vecteur de temps comme abscisses et le vecteur de la réponse impulsionnelle comme ordonnées.

La transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle du filtre passe-bas est calculée et décalée.

Un vecteur de fréquences compris entre $-F_e/2$ et $F_e/2$ est créé en utilisant l'intervalle de fréquences correspondant à chaque élément du vecteur de la transformée de Fourier.

La réponse en fréquence du filtre passe-bas est tracée sur un graphique en utilisant le vecteur de fréquences comme abscisses et la valeur absolue du vecteur de la transformée de Fourier comme ordonnées.

4.2 Synthèse du filtre passe-haut

Dans cette section, nous avons synthétisé un filtre passe-haut (PH) en utilisant la réponse impulsionnelle du filtre passe-bas (PB) précédemment déterminée. Pour ce faire, nous avons simplement utilisé la formule suivante : $\text{signal-filtre-PH} = \text{dirac1}(k * T_e) - \text{signal-filtre-PB}$.

Nous avons ensuite affiché la réponse impulsionnelle du filtre PH en utilisant la commande plot et en spécifiant le vecteur des temps temps et le vecteur de la réponse impulsionnelle signal-filtre-PH.

Nous avons également affiché la réponse en fréquence du filtre PH en utilisant la commande plot et en spécifiant le vecteur des fréquences F2 et le vecteur de la réponse en fréquence fft-filtre-PH.

Ces résultats nous permettent de visualiser la réponse impulsionnelle et la réponse en fréquence du filtre PH synthétisé, ce qui est essentiel pour la suite de l'étude du modem de fréquence.

4.3 Résultats obtenus avec un ordre des filtres de 61

A COMPLETER

4.4 Modification de l'ordre des filtres

A COMPLETER

4.5 Utilisation des fréquences de la recommandation V21

A COMPLETER

5 Démodulateur de fréquence adapté à la norme V21

5.1 Contexte de synchronisation idéale

La figure 3 présente le récepteur implanté afin de retrouver, dans un contexte de synchronisation idéale, le message binaire envoyé à partir du signal modulé en fréquence suivant la recommandation V21.

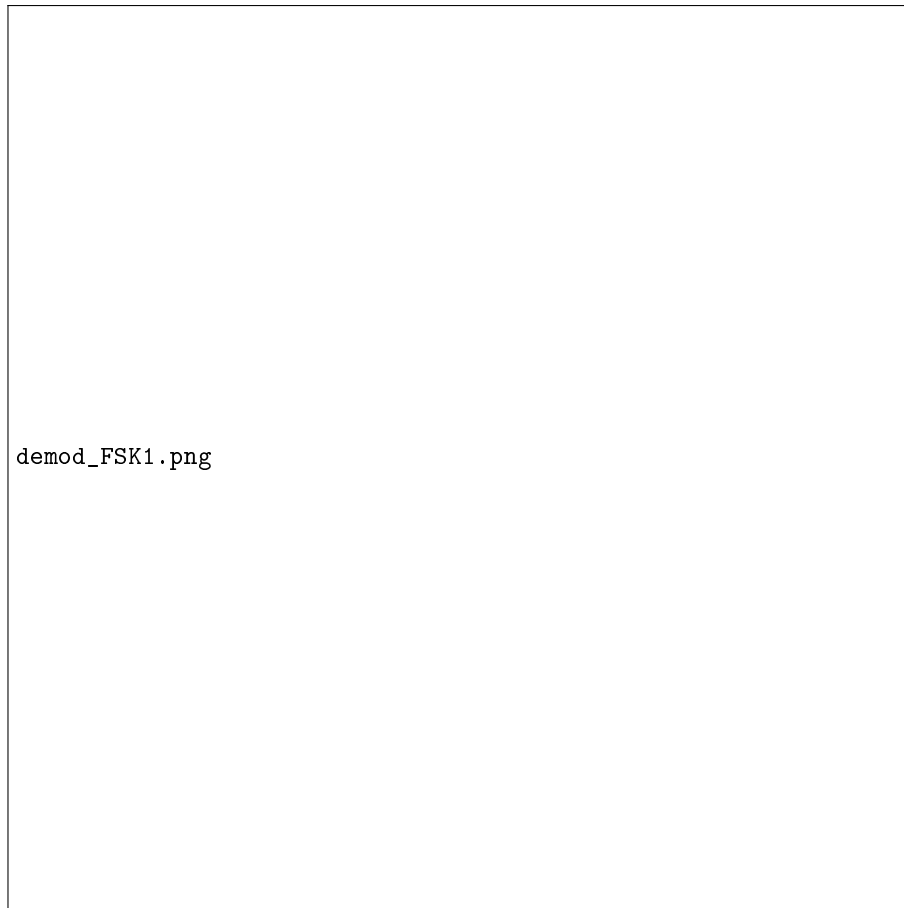


FIGURE 3 – Démodulation FSK. Synchronisation supposée idéale.

5.1.1 Principe de fonctionnement de ce récepteur

A COMPLETER

5.1.2 Résultats obtenus

A COMPLETER

5.2 Gestion d'une erreur de synchronisation de phase porteuse

Le problème de la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur est un problème important lorsque l'on réalise une transmission. Les deux doivent être parfaitement synchronisés en temps et en fréquence pour que le démodulateur implanté précédemment fonctionne, ce qui en pratique n'est bien entendu pas possible. Afin que le modem puisse continuer à fonctionner en présence d'une

erreur de phase porteuse, celui-ci doit être modifié. La figure 4 présente un démodulateur permettant de s'affranchir de problèmes de synchronisation de phase entre les oscillateurs d'émission et de réception.

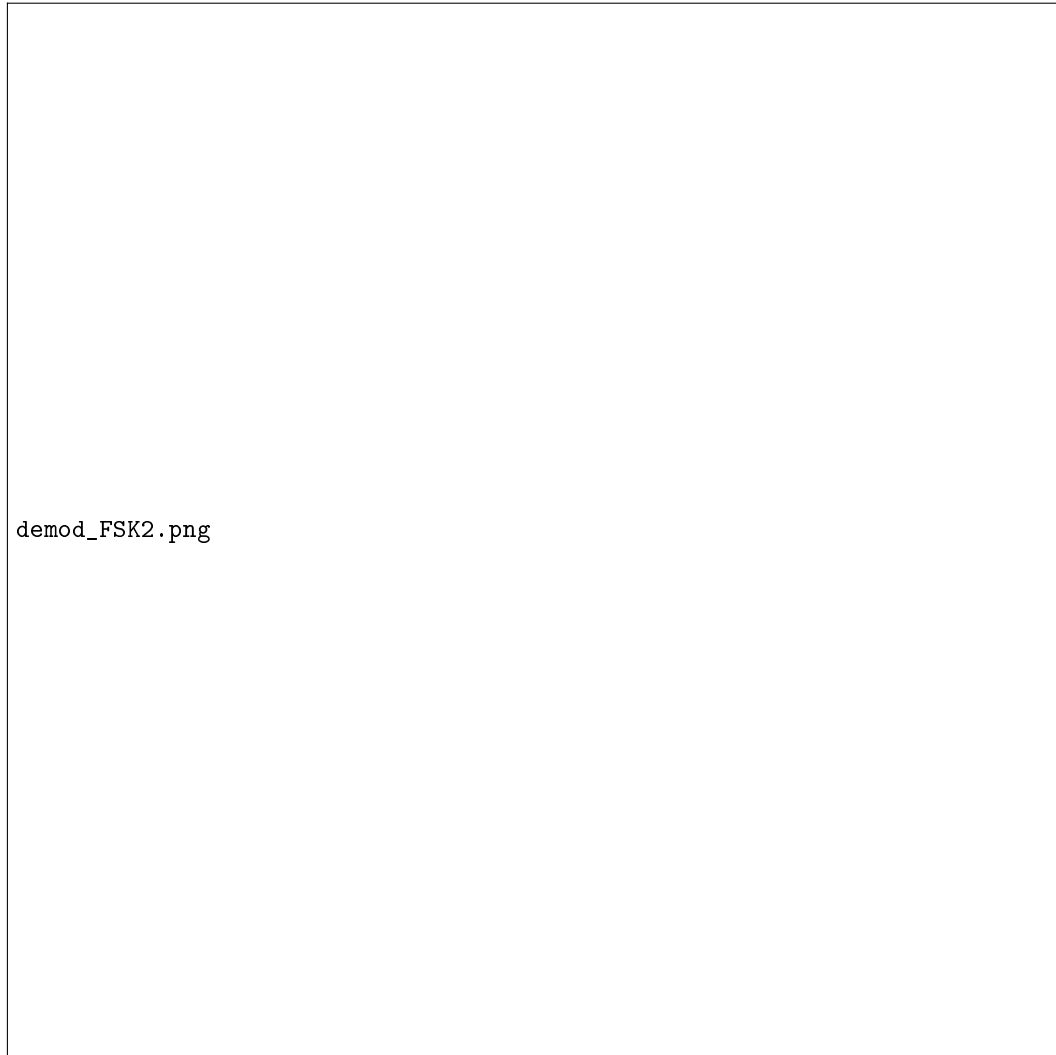


FIGURE 4 – Démodulation FSK - Gestion d'une erreur de phase porteuse.

5.2.1 Impact d'une erreur de phase porteuse sur le modem implanté précédemment

A COMPLETER

5.2.2 Principe de fonctionnement de cette nouvelle version du modem de fréquence

A COMPLETER (comment ce nouveau démodulateur permet il de gérer une erreur de phase porteuse)

5.2.3 Résultats obtenus

A COMPLETER

6 Conclusion

A COMPLETER

7 Références

A COMPLETER