

# Laboratoire 2 - Modulation en fréquence

## 1 Théorie

Considérez un signal modulant donné par

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) + c, \quad (1.1)$$

et un signal porteur donné par

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t). \quad (1.2)$$

Après une modulation FM, on obtient le signal

$$y(t) = A_c \cos \left( 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(t') dt' \right), \quad (1.3)$$

où  $k_f$  est l'*indice de sensibilité*, exprimé en Hz/V.

Dans le cas particulier d'un message sinusoïdal considéré ici, cette expression devient

$$\begin{aligned} y(t) &= A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f c t + \beta \sin(2\pi f_m t)) \\ &= A_c \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f c t + 2\pi k f_m t), \end{aligned} \quad (1.4)$$

où  $J_k$  est la *fonction de Bessel d'ordre  $k$* ,  $\beta = \Delta_f / f_m$  est l'*indice de modulation*, et  $\Delta_f = k_f A_m$  est la *déviaton de fréquence*. Les valeurs des fonctions de Bessel d'ordre  $k = \{0, \dots, 15\}$  pour  $\beta = \{2.5, 5, 10\}$  sont illustrées dans la Figure 1.1.

---

**Question :** Quel est le spectre du signal modulé ?

---

---

**Question :** Quelles sont les deux propriétés des fonctions de Bessel ayant des conséquences sur l'énergie, la puissance et la forme du contenu spectral du signal modulé ?

---

### Formule de Carson

En théorie, le contenu spectral du signal modulé se répand sur l'ensemble du spectre. Cependant, pour des valeurs de  $k$  élevées, les valeurs des fonctions de Bessel  $J_k$  deviennent négligeables. Par conséquent, la *formule de Carson* permet d'estimer la bande passante  $B$ . Pour un message sinusoïdal,

$$B \approx 2(f_m + \Delta_f) = 2f_m(1 + \beta). \quad (1.5)$$

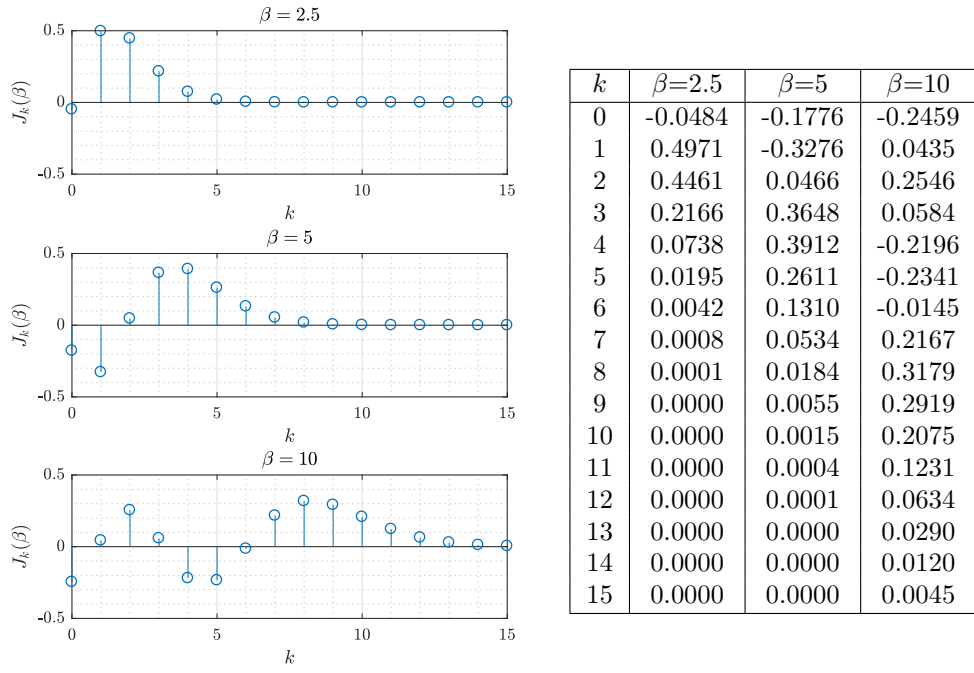


Figure 1.1: Fonction de Bessel  $J_k(\beta)$  d'ordre  $k = \{0, \dots, 15\}$ , et  $\beta = \{2.5, 5, 10\}$ .

## 2 Implémentation LabVIEW

### 2.1 Simulation

L'implémentation de la chaîne de transmission via modulation FM est similaire à votre précédente implémentation de la chaîne de transmission via modulation AM. Cependant, les blocs *MT Modulate AM (DSB)* et *MT Demodulate AM (DSB)* doivent être respectivement remplacés par les blocs *MT Modulate FM* et *MT Demodulate FM*, qui se trouvent dans les mêmes catégories de la boîte à outils à gauche de la fenêtre. Notez que, comme pour le précédent laboratoire, la modulation s'effectue en deux étapes : le signal est d'abord modulé en fréquence puis est transféré en radio-fréquence. Les étapes inverses sont alors réalisées à la démodulation.

### 2.2 Radio FM via USRPs

*Commencez par répondre aux questions de la Section 3 avant de réaliser cette partie de l'implémentation.*

La modulation FM est largement utilisée en Belgique pour les transmissions radio<sup>1</sup>. En utilisant les stations USRPs disponibles dans le laboratoire Marconi, il est donc possible d'écouter la radio et d'analyser le signal transmis via une chaîne LabVIEW.

1. Commencez par ouvrir le projet LabVIEW *FMRadio*, et complétez la chaîne de réception du fichier *Main Demodulate.gvi*. Notez que la conversion du signal en bande de base (effectuée dans votre chaîne de transmission par le bloc *MT Downconvert Passband (Real)*) est déjà effectuée par l'USRP, et vous pouvez utiliser l'indice de sensibilité par défaut du bloc *MT Demodulate FM*.
2. Via l'onglet *Panel*, connectez-vous à un USRP récepteur (RX) **qui n'est pas utilisé par un autre groupe** en encodant son adresse IP. Les adresses IP des USRPs sont spécifiées sur [Moodle](#).
3. Encodez la fréquence du signal porteur à Louvain-la-Neuve de la radio que vous voulez écouter et analyser.
4. Profitez quelques secondes du programme en cours.

---

**Question :** Analysez le spectre du signal audio démodulé (via le *Frequency plot*, où l'axe des abscisses correspond bien aux fréquences en Hz). Essayez différents *averaging modes* pour obtenir un graphe moins bruyant et ne variant pas dans le temps. A quoi correspondent les différentes parties de la bande de fréquence ? Est-ce un signal audio en mono ou stéréo ?

---

---

<sup>1</sup>Actuellement et dans les prochaines années, la modulation FM est progressivement remplacée par la [modulation DAB+](#). Cependant, vous pouvez toujours écouter la radio FM au jour d'aujourd'hui.

### 3 Questions

Considérons les paramètres par défaut suivants :

- amplitude du signal modulant  $A_m = 1V$  ;
- offset du signal modulant  $c = 0V$  ;
- fréquence du signal modulant  $f_m = 5kHz$  ;
- amplitude de la porteuse  $A_c = 1V$  ;
- fréquence de la porteuse  $f_c = 2MHz$  ;
- indice de modulation  $k_f = 25kHz/V$ .

Notez que, comparé au laboratoire précédent, la fréquence du signal modulant est beaucoup plus faible. Par conséquent, la période d'acquisition  $T$  (et potentiellement d'autres paramètres) doit être modifiée en fonction de la configuration du simulateur. Pour indication, vous pouvez utiliser une période d'acquisition  $T = 2ms$ .

Sur base de votre implémentation, répondez aux questions suivantes :

#### 1. Modulant-Modulé

- Visualisez les signaux modulant et modulé en base de temps et en fréquence<sup>2</sup>.
- Ajoutez un offset  $c = 2V$  au signal modulant. Est-ce que l'impact de l'offset correspond à vos attentes ?
- Peut-on, au vu du spectre du signal modulé, déterminer la fréquence du signal modulant et de la porteuse ? Comment ?
- Quelle est la relation entre l'amplitude du signal modulant et l'indice de modulation ? Comment évolue le spectre quand l'amplitude augmente ?
- Quelle est la relation entre la fréquence du signal modulant et l'indice de modulation ? Comment évolue le spectre quand cette fréquence augmente ?
- La bande passante varie-t-elle linéairement en fonction de  $A_m$  et de  $f_m$  ? Comparez la bande passante observée à celle fournie par la formule de Carson. Pour déterminer la bande passante observée en simulation, vous êtes encouragés à représenter le module du spectre en dB et à négliger les raies qui sont à plus de 20dB en-dessous de la porteuse non modulée.

#### 2. Modulant-Démodulé

- Visualisez, en base de temps et en mode X-Y, les signaux modulant et démodulé. Calculez le déphasage entre le signal modulant et démodulé pour différentes fréquences du signal modulant.
- **BONUS** : Dans une démodulation FM en hardware, un *discriminateur* est utilisé pour récupérer le message. Quelles sont les fonctions de ce bloc ? Dans ce laboratoire, la démodulation s'effectue d'une autre manière. Décrivez les différentes étapes de la démodulation FM comme abordée dans ce document.

---

<sup>2</sup>Il vous sera difficile d'observer le signal modulé en base de temps, à cause de la fréquence élevée de la porteuse. Toutefois, en utilisant les paramètres indicatifs suivants ( $T = 1s$ ,  $f_s = 2MHz$ ,  $f_c = 100Hz$ ,  $A_m = 1V$ ,  $f_m = 2Hz$  et  $k_f = 100Hz/V$ ), il vous sera possible d'observer la modulation FM en temporel. Malheureusement, à des fréquences si faibles, la chaîne LabVIEW n'est pas capable de démoduler votre signal sans renvoyer une erreur. Veuillez donc à bien remettre les valeurs des paramètres données au début de cette section pour la suite des questions.