



2^e Année semestre 8 – Mineure d'électronique
Cours « Modulations analogiques et bruit »

TP A : MODULATIONS ANALOGIQUES (MESURES)

Objectifs : cette manipulation permet de se familiariser avec les propriétés temporelles et spectrales des porteuses modulées en amplitude et en fréquence. Cette manipulation constitue aussi une prise en main de l'analyseur de spectre.

☞ En présence de votre enseignant, observez les principaux réglages de l'analyseur de spectre : Center Frequency, Span, Amplitude, RBW : Resolution BandWidth.

Notez l'impédance d'entrée de l'analyseur : $50\ \Omega$, le niveau maximum de puissance d'entrée, la protection éventuelle de l'instrument par un atténuateur externe de 10 dB.

0. ANALYSEUR DE SPECTRE

Pour se familiariser avec l'analyseur de spectre, analyser (montage ci-dessous)

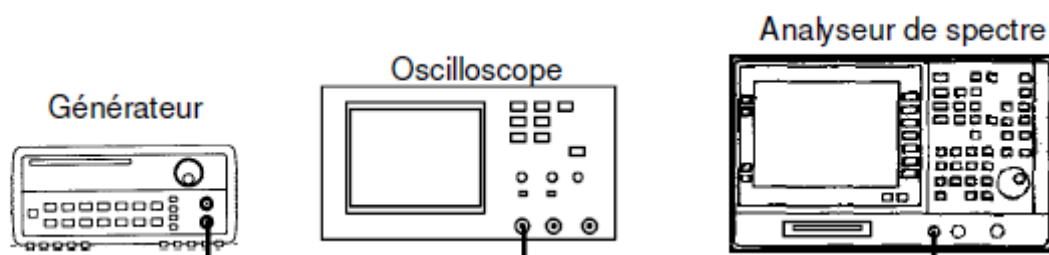
-un signal périodique déterministe (par exemple une sinusoïde à 1MHz à un niveau de 0dBm sous 50Ω). Choisir et faire varier les paramètres de l'analyseur de spectre pour une visualisation du signal convenable (par exemple en plaçant la raie principale au centre de l'écran, son sommet étant un carreau sous le haut de l'écran). Que se passe-t-il quand on diminue la RBW ? Augmenter alors en manuel la vitesse de balayage jusqu'à ce que l'indication UnCal apparaisse. Qu'advient-il du niveau et de la fréquence lus de la raie principale ?

-la présence et le niveau d'éventuelles harmoniques de ce signal en revenant en mode Calibré et en modifiant les réglages (notamment fréquence centrale et Span) de manière à pouvoir les détecter .

- un bruit issu du générateur (niveau 0dBm), jusqu'à quelle fréquence peut-il être considéré comme blanc ? Que se passe-t-il de fondamentalement différent d'un signal périodique lorsqu'on diminue la RBW ? Estimer la densité spectrale de puissance de ce bruit.

1. MODULATION D'AMPLITUDE

1.1 Aspect temporel et spectre de la porteuse modulée



On utilise un générateur délivrant un signal de porteuse modulée en amplitude de la forme

$$p(t) = A_0 [1 + m s_u(t)] \cos(2\pi f_0 t)$$

On prendra pour la suite :

- fréquence de porteuse sinusoïdale : **1 MHz**
- niveau de porteuse non modulée : **0 dBm** (sur 50 Ω).

- **Signal modulant sinusoïdal**

Etudier *l'aspect temporel* et le *spectre* de la porteuse modulée dans les cas suivants :

(a) $F = 10 \text{ kHz}$ et pour $m = 0,5$; $m = 1$; $m > 1$.

☞ relever sur l'oscilloscope les valeurs de crêtes et creux de modulation, vérifier la cohérence avec la valeur de m ,

☞ relever le niveau des diverses raies du spectre en dBm et interpréter les valeurs.

(b) $m = 0,5$: faire varier F et observer la façon dont le spectre se modifie.

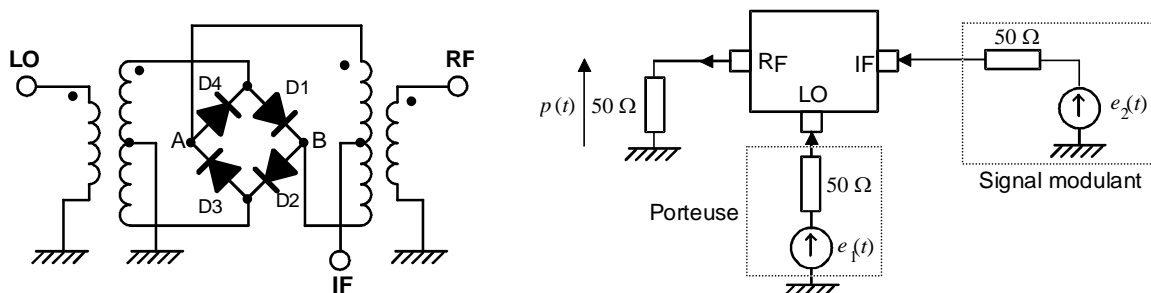
- **Signal modulant rectangulaire périodique**

Etudier *l'aspect temporel* et le *spectre* de la porteuse modulée pour :

- $F = 10 \text{ kHz}$ (fréquence fondamentale)
- $m = 0,5$.

☞ interpréter l'allure du spectre de la porteuse modulée (d'après le spectre théorique du signal modulant).

1.2 Modulateur en anneau



Ce circuit permet d'effectuer une modulation d'amplitude sans porteuse, du type découpage. Le signal de porteuse attaque le port "LO" (*Local Oscillator*) et le signal modulant est appliqué sur port "IF" (*Intermediate Frequency*). Le signal de porteuse modulée est récupéré en sortie du port "RF" (*Radio Frequency*).

Etudier *l'aspect temporel* et le *spectre* de la porteuse modulée avec les valeurs suivantes :

Porteuse : **1 MHz** , niveau **7 dBm** ;

Signal modulant : sinusoïdal, **100 kHz**, niveau **-20 dBm**.

⇒ Vérifier, au niveau temporel et au niveau spectral, que le modulateur possède bien un fonctionnement proche de celui d'un découpeur.

⇒ Observer l'amélioration du signal modulé lorsqu'on utilise le filtre sélectif RF présent sur la maquette du modulateur en anneau. Pour l'interprétation spectrale, réglez l'analyseur afin de pouvoir observer les fréquences multiples de f_0 .

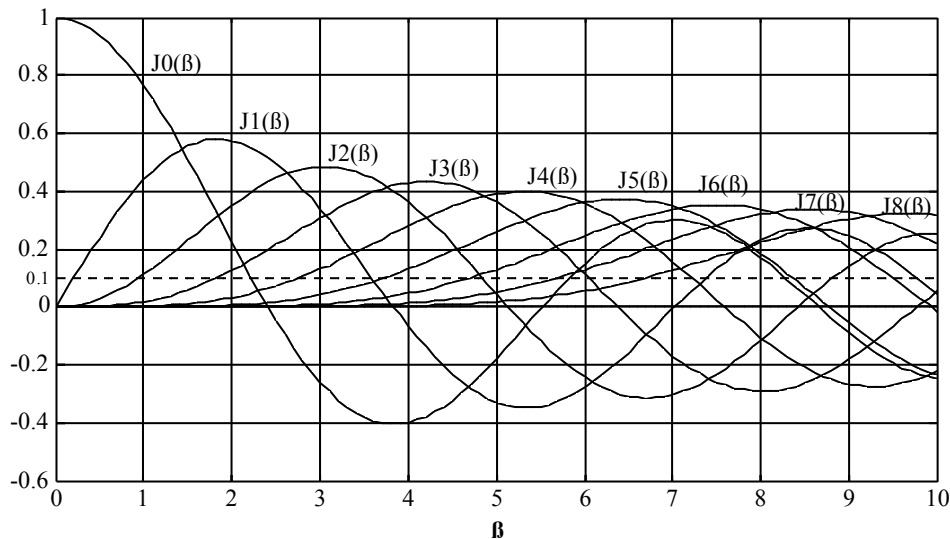
2. MODULATION DE FREQUENCE

La porteuse modulée en fréquence est de la forme

$$p(t) = A_0 \cdot \cos [2\pi f_0 t + \beta \sin(2\pi F t)] \quad , \quad \beta = \frac{\Delta f}{F}$$

On prendra :

- . $f_0 = 5 \text{ MHz}$ fréquence de porteuse
- . $A_0 \rightarrow$ niveau absolu de **0 dBm** (sur 50 Ω)



On rappelle ci-dessus la forme des fonctions de Bessel de première espèce.

On étudie le spectre de la porteuse modulée en faisant varier l'indice de modulation β .

On fixe la fréquence du modulant à $F = 10 \text{ kHz}$, on ajuste Δf (frequency deviation) afin d'avoir des valeurs particulières de $\beta = 2,40 ; 3,83 ; 5,52$.

On complète ces valeurs remarquables par une valeur élevée, par exemple $\beta = 100$.

Dans chaque cas, vérifier :

- ♦ l'annulation de la raie porteuse ou de raies latérales ;
- ♦ l'écart en fréquence entre deux raies consécutives du spectre ;
- ♦ l'approximation de la **largeur spectrale** par la **bande de CARSON** : $B_T \approx 2(\beta+1)F = 2(\Delta f + F)$

Pour ce dernier point, on peut procéder de la façon suivante :

- repérer le niveau de la raie porteuse non modulée (normalement 0 dBm) ;
- les raies latérales dont l'amplitude est supérieure ou égale au 1/10 de l'amplitude de la porteuse non modulée (soit -20dBm) sont, par définition, dans la *bande de CARSON* ;
- vérifier le nombre de ces raies significatives lorsque β le permet.

Attention pour la valeur élevée $\beta = 100$ au bon réglage de l'analyseur de spectre afin de mesurer la largeur de bande de Carson.

TP B : MODULATION D'AMPLITUDE SIMULATION

Objectifs : ce TP permet de se familiariser avec les propriétés temporelles et spectrales des porteuses modulées en amplitude. La démodulation synchrone cohérente et la démodulation non cohérente sont étudiées. Enfin ce TP constitue aussi une prise en main du logiciel de simulation MATLAB Simulink.

Démarrer MATLAB (version R2014b ou versions suivantes) et cliquer sur le bouton Simulink Library (ou bien taper simulink à l'invite de commande dans la fenêtre Command Window).

1. Modulation par multiplication

Le signal de porteuse AM étudié est du type "double bande avec porteuse" :

$$p(t) = A_0 [1 + m \cdot s_u(t)] \cos(2\pi f_0 t)$$

avec $s_u(t) = \frac{s(t)}{s_{\max}}$: signal de modulation unitaire ($|s_u(t)| \leq 1$)

m : taux de modulation

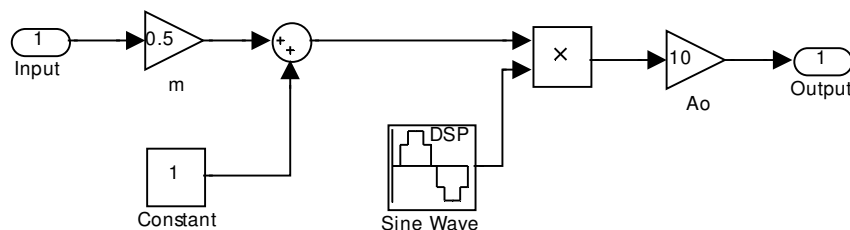
On fixera les valeurs $f_0 = 20 \text{ kHz}$: fréquence porteuse

$A_0 = 10 \text{ V}$: amplitude de porteuse non modulée

1.1 Construction du modulateur

Dans la fenêtre Simulink Library Browser, cliquer sur le bouton New/Model afin de créer une feuille de travail (ou bien depuis le bureau Matlab : New / Simulink model).

Enregistrer régulièrement votre travail dans un répertoire à votre nom dans D:\Documents élèves. Les fichiers ont l'extension .slx



Block	Simulink Library Browser
In1	Simulink/Sources
Constant	Simulink/Sources
Gain	Simulink/Math Operations
Sum	Simulink/Math Operations
Product	Simulink/Math Operations
Out1	Simulink/Sinks
Sine Wave	DSP System Toolbox/ Sources

Aller chercher les différents éléments et les cliquer-glisser dans la feuille de travail. Pour connecter les blocs positionner le pointeur de souris sur le port de sortie, il prend la forme d'une croix, maintenir le clic gauche jusqu'au port d'entrée du bloc souhaité.

Afin de définir les paramètres d'un bloc, double-cliquer sur le bloc.

Paramétrage du bloc Sine Wave

Amplitude : 1

Frequency (Hz) : 20e3

Phase offset (rad) : $\pi/2$ *(pour cosinus)*

Sample mode : Discrete

Output complexity : Real

Computation method : Trigonometric fcn

Sample time : 1e-6 *(valeur de la période d'échantillonnage T_s)*

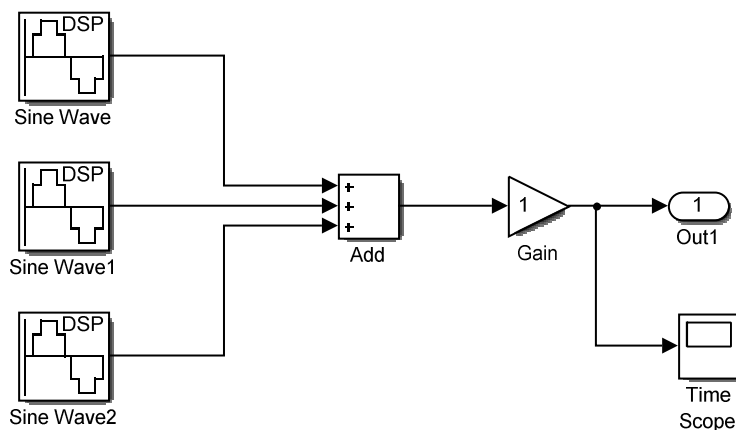
Samples per frame : 1

Créer un sous-système qui sera nommé Modulateur AM : sélectionner tous les éléments puis Diagram/ Subsystem & Model Reference/ Create Subsystem from selection.

1.2 Construction du signal modulant

Le signal modulant pourra être :

- soit un signal sinusoïdal simple d'amplitude 1V et de fréquence $F = 0.5\text{kHz}$
- soit un signal composite formé de la somme de trois sinusoïdes d'amplitudes et fréquences (1V ; 0.5kHz) , (0.5V ; 1.5kHz) , (0.2V ; 2.5kHz).



Block	Simulink Library Browser
Sine Wave	Signal Processing Blockset/Signal Processing Sources
Add	Simulink/Math Operations
Gain	Simulink/Math Operations
Out1	Simulink/Sinks
Time Scope	DSP System Toolbox/ Sinks

Paramétrage des blocs Sine Wave

Amplitude : *(valeur en volt)*

Frequency (Hz) : *(valeur en hertz)*

Phase offset (rad) : 0 *(0 pour sinus)*

Sample mode : Discrete

Output complexity : Real

Computation method : Trigonometric fcn

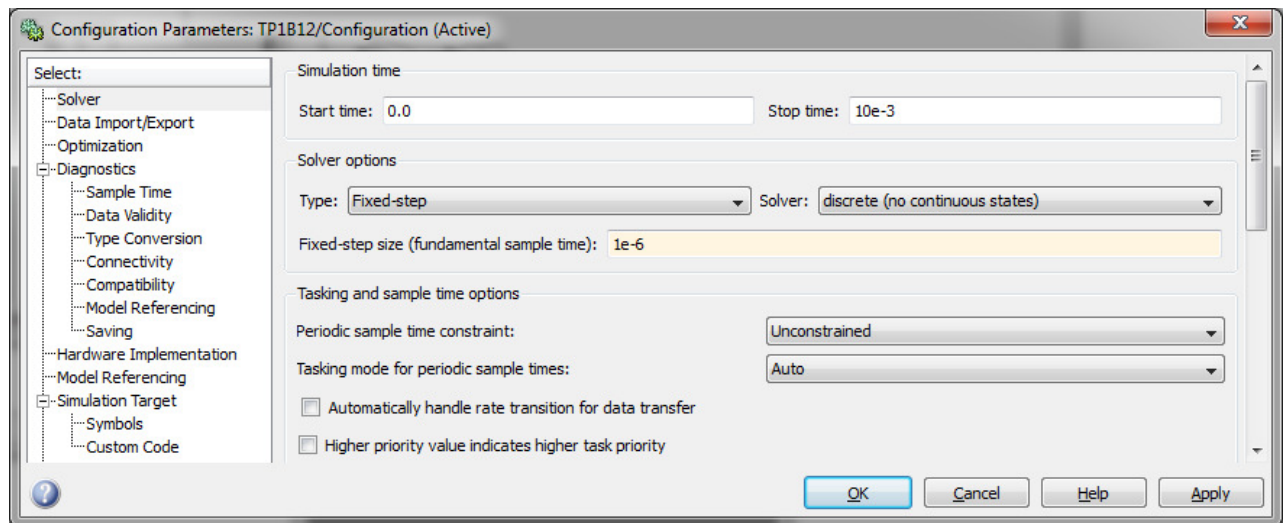
Sample time : 1e-6 *(valeur de la période d'échantillonnage T_s)*

Samples per frame : 1

Paramétrage du bloc Add

List of signs : ++++

Afin de définir la simulation à effectuer : Simulation/ Model Configuration Parameters.



Nous choisissons un solveur de type discret, avec un pas de calcul fixé à $T_s = 1\mu s$. La durée de simulation est de 10ms.

Afin de lancer la simulation : Simulation/ Run (ou bouton Run).

Paramétrage du bloc Time Scope

Bouton Configuration Properties, onglet Main

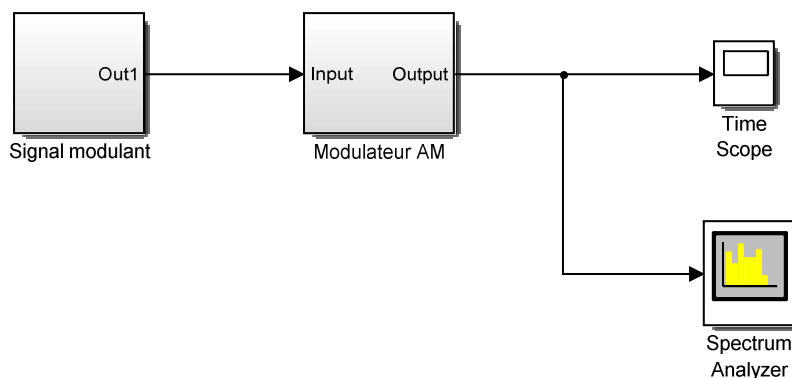
Par défaut la taille du buffer est de 5000 pts : pour éviter que l'affichage ne soit trop long, Time Scope affiche les 5000 derniers points calculés. Si l'on souhaite visualiser l'ensemble des points calculés, il faut modifier la taille du buffer.

Visualiser le signal modulant composite.

Déterminer la valeur du gain (initialement à 1) qui permet de rendre ce signal modulant unitaire.

Créer un sous-système qui sera nommé Signal Modulant : sélectionner tous les éléments puis Diagram/ Subsystem & Model Reference/ Create Subsystem from selection.

1.3 Etude du signal modulé



Block	Simulink Library Browser
Time Scope	Signal Processing Blockset/Signal Processing Sinks
Spectrum Analyzer	DSP System Toolbox/ Sinks
Zero-Order Hold	Simulink/Discrete

Le bloqueur d'ordre zéro qui précède le bloc Spectrum Analyzer sera paramétré avec la valeur T_s . Ce bloc est facultatif ici car le solveur choisi est discret, il serait indispensable avec un solveur continu de type ode (ordinary differential equation).

Nous choisissons de paramétrer le bloc Spectrum Analyzer comme un analyseur de spectre de laboratoire : impédance d'entrée de 50Ω et mesure de puissance en dBm.

Pour le calcul de Transformée de Fourier Rapide (FFT) un buffer spécifie le nombre 2^N d'échantillons à considérer, **ce nombre doit inférieure ou égal au nombre de points calculés lors de la simulation (sinon aucun spectre ne s'affichera).**

Le logiciel note F_s la fréquence d'échantillonnage et T_s la période d'échantillonnage (sample time).

L'ordre de grandeur de la résolution spectrale est $\Delta f = \frac{F_s}{2^N}$

On peut choisir une fenêtre rectangulaire ou appliquer un fenêtrage particulier à la séquence, la fenêtre de Hanning est bien adaptée à l'analyse spectrale.

On pourra commencer par une FFT de longueur 8192 puis on l'augmentera afin d'observer le spectre attendu : spectre de raies, avec une résolution suffisante pour les mesures. Ne pas oublier d'augmenter en conséquence la durée de simulation afin d'obtenir un nombre suffisant de points.

Paramétrage du bloc Spectrum Analyzer (exemple)

Bouton Spectrum Settings

Main options/ Type: Power

Full frequency span (affichage sur $[0...F_s/2]$)

Remplacer RBW par : Window length : 8192

NFFT : 8192 (doit être une puissance de 2)

Window options/ overlap 0%

window: Hann

Trace options/ Units : dBm

Averages: 1

Reference load : 50

Scale: linear

Offset (Hz): 0

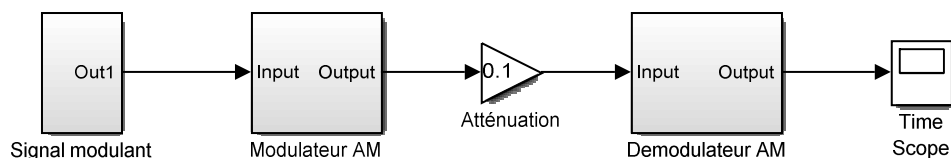
Décocher : Two-sided spectrum

On pourra commencer l'étude avec un signal modulant simple : une sinusoïde d'amplitude 1V et de fréquence 0.5kHz (mettre l'amplitude des autres sinusoïdes à zéro et le gain à 1).

☛ Pour différentes valeurs du taux de modulation, par exemple $m = 0.5$ et $m = 1.5$, étudier l'aspect temporel et l'aspect spectral de la porteuse modulée. On relèvera notamment les valeurs des crêtes et des creux de modulation, la position et le niveau des raies spectrales en dBm. On justifiera les résultats obtenus.

☛ Etudier l'aspect temporel et l'aspect spectral de la porteuse modulée avec le signal modulant unitaire composé des 3 sinusoïdes. Pour le spectre, on interprètera uniquement la position des raies.

2. Démodulation

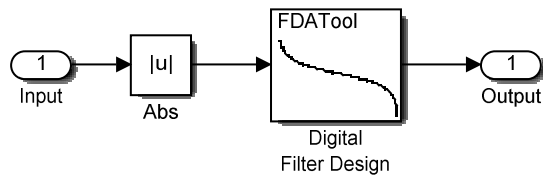


Le canal de transmission est ici modélisé par une simple atténuation d'un facteur 10.

Le bloc Time Scope peut être utilisé pour visualiser simultanément le signal modulant :

Configuration properties/ Number of input ports : 2

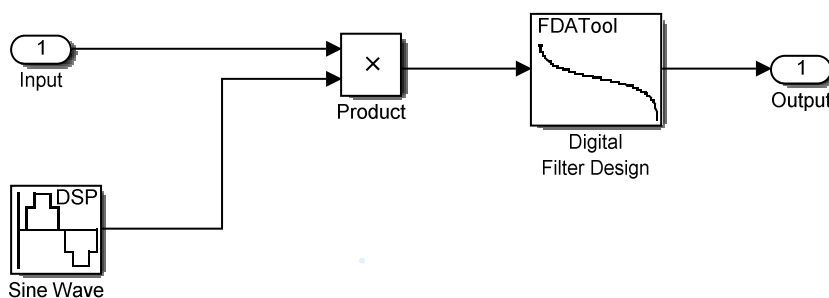
2.1 Démodulateur non cohérent



Block	Simulink Library Browser
Digital Filter Design	DSP System Toolbox /Filtering/Filter Implementations
Abs	Simulink/Math Operations
In1	Simulink/Sources
Out1	Simulink/Sinks

- ☛ Expliquer le principe de fonctionnement de ce démodulateur, justifier que le filtre doit être passe-bas. Exprimer le signal démodulé $s_d(t)$ en fonction de $s_u(t)$.
- ☛ Paramétrer le filtre passe-bas (de type Butterworth ou Chebyshev) en justifiant vos choix.
- ☛ Pour $m = 0.5$, observer l'aspect temporel du signal démodulé. Mesurer la valeur du gain de démodulation (défini comme le rapport des amplitudes s_d / s_u), comparer à la valeur attendue. Mesurer le retard de propagation entre s_u et s_d , quelle est l'origine de ce retard ?
- ☛ Quelle est la valeur maximale de m pour un fonctionnement correct de ce démodulateur ?

2.2 Démodulateur synchrone cohérent



- ☛ Expliquer le principe de fonctionnement de ce démodulateur. Exprimer le signal démodulé $s_d(t)$ en fonction de $s_u(t)$.
- ☛ Paramétrer les blocs en justifiant vos choix.
- ☛ Pour $m = 0.5$, observer l'aspect temporel du signal démodulé. Mesurer la valeur du gain de démodulation (défini comme le rapport des amplitudes s_d / s_u), comparer à la valeur attendue. Mesurer le retard de propagation entre s_u et s_d , quelle est l'origine de ce retard ?
- ☛ Ce procédé de démodulation est-il utilisable pour toute valeur de m ?