

Communications Numériques

Textes de TP

Licence 3 : Télécommunications

Faculté de Génie Electrique

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Contenu de la matière**Introduction :**

Rappels divers sur les signaux numériques et les processus aléatoires

Chapitre 1. Transmission numérique en bande de base

Eléments d'une chaîne de transmission numérique, modulation en bande de base. Codes en ligne (Conversion bits/symboles et Mise en forme), Code NRZ polaire, Code NRZ unipolaire, Code RZ unipolaire, CodeBiphase/Manchester, Code HDB3 (Haute Densité Bipolaire d'ordre 3), Codes en lignes M-aires (Codes NRZ M-aires), Densité spectrale de puissance des codes en ligne, Critères de choix d'un code en ligne. Notion d'enveloppe complexe.

Chapitre 2. Récepteur optimal

Structure d'un récepteur à M signaux, représentation vectorielle des signaux et du bruit, détection optimal (détecteur MAP pour maximum a posteriori et détecteur ML pour maximum likelihood), Structure du récepteur optimal (autocorrélation ou filtrage adapté sur chacune des voies puis décision).

Chapitre 3. Transmission sans interférence entre symboles

Effet du Canal sur la forme d'onde du code en ligne, Caractéristiques de l'Interférence entre symboles, Diagramme de l'œil, Condition d'absence d'interférence entre symboles, Critère de Nyquist, filtre en cosinus surélevé, Performances en termes de probabilité d'erreur d'un système M-aire avec filtrage de Nyquist, Répartition du filtrage entre l'émission et la réception.

Chapitre 4. Performances pour une transmission en bande de base

Détection d'un signal binaire et test des hypothèses, critère du maximum de vraisemblance, rapport de vraisemblance, récepteur binaire optimal à deux corrélateurs, à un seul corrélateur et à base de filtre adapté. Probabilité d'erreur pour le cas d'un bruit blanc gaussien avec filtre passe bas et filtre adapté.

Chapitre 5. Modulations numériques à bande étroite

Principe, Modulation à déplacement d'amplitude (ASK), Modulation OOK, Modulations M-ASK symétriques, Réalisation physique et performances, Modulation à déplacement de phase (PSK), Constellations, Modulations M-PSK, Réalisation physique et performances, Modulation à deux porteuses en quadratique (QAM), Réalisation physique et performances, Modulation à déplacement de fréquence (FSK), Modulation MSK, Réalisation physique et performances d'une FSK binaire.

TP n°1 : Prise en Main de Radio GNU

But du TP : Se familiariser avec l'environnement GNU Radio Companion (GRC), la création de flowgraphs et la manipulation des signaux sinusoïdaux et bruités.

Objectifs pédagogiques :

- Comprendre la structure d'un flowgraph GRC.
- Générer et visualiser un signal sinusoïdal bruité.
- Appliquer un filtrage passe-bas et analyser les résultats en temps et en fréquence.
- Manipuler les différents types de blocs et comprendre leur configuration.

1. GNU Radio

GNU Radio est un **cadriciel open-source** pour le traitement du signal, utilisé dans :

- Les systèmes de communication sans fil (radios logicielle SDR)
- La recherche, l'enseignement et le prototypage
- L'analyse de signaux analogiques et numériques

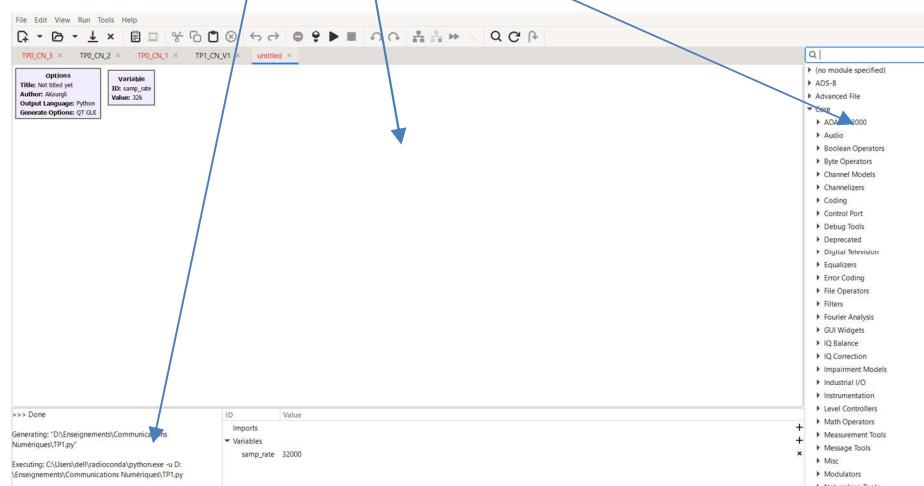
GNU Radio Companion (GRC) est une interface **graphique** qui permet de créer des **flowgraphs** en glissant-déposant des **blocs fonctionnels** : Source → traitement → visualisation

Installation de GNU Radio <https://wiki.gnuradio.org/index.php/InstallingGR>

Une fois installé, lance le logiciel : gnuradio-companion

Tu accèdes alors à l'interface GRC composée de :

- Une **bibliothèque de blocs** à gauche
- Une **zone de dessin** au centre (flowgraph)
- Une **console** en bas pour les logs



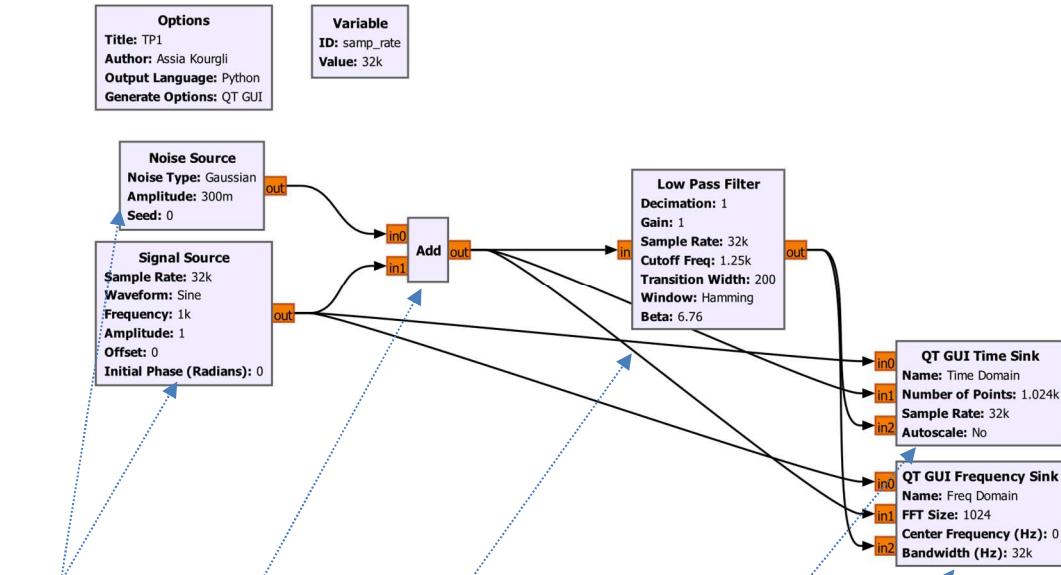
Blocs typiques à connaître dès le début

Bloc	Rôle
• Vector Source / Random Source	Génération de données
• Throttle	Contrôle du débit (évite surcharge CPU)
• QT GUI Time Sink	Affichage dans le domaine temporel
• QT GUI Frequency Sink	Affichage dans le domaine fréquentiel (DSP)
• Add, Multiply, Repeat	Traitements élémentaires
• Selector, Mux	Routage et commutation de signaux

Fichiers .grc

- Chaque TP est livré sous forme de fichier .grc
- Pour l'ouvrir : **Fichier > Ouvrir** dans GNU Radio Companion
- Pour exécuter : clique sur le bouton en haut ou fais Ctrl+R

2. Manipulation 1 : Filtrage d'une sinusoïde bruitée → Flowgraph à réaliser



Bloc 1 : Signal Source

- Output Type : Float
- Sample Rate : samp_rate
- Frequency : 1000
- Amplitude : 1.0
- Waveform : SINE

Bloc 2 : Noise Source

- Output Type : Float
- Amplitude : 0.3
- Sample Rate : 32000

Bloc 3 : Add

- IO Type : float
- Inputs : 2

Connecter les sorties de Signal Source et Noise Source à ce bloc.

Bloc 4 : Low Pass Filter

- FIR Type : Float → Float Decimating
- Decimating : 1
- Gain : 1
- Sample Rate : samp_rate
- Cutoff Freq : 1250
- Transition Width : 200
- Window : Hamming

Connecter la sortie de Add à ce filtre.

Bloc 5 : QT GUI Time Sink

- Inputs : 3
- Sample Rate : samp_rate
- Autoscale : No

Connecter la sortie de Signal Source (direct) sur l'entrée 0

Connecter la sortie du filtre sur l'entrée 1

Bloc 6 : QT GUI Frequency Sink

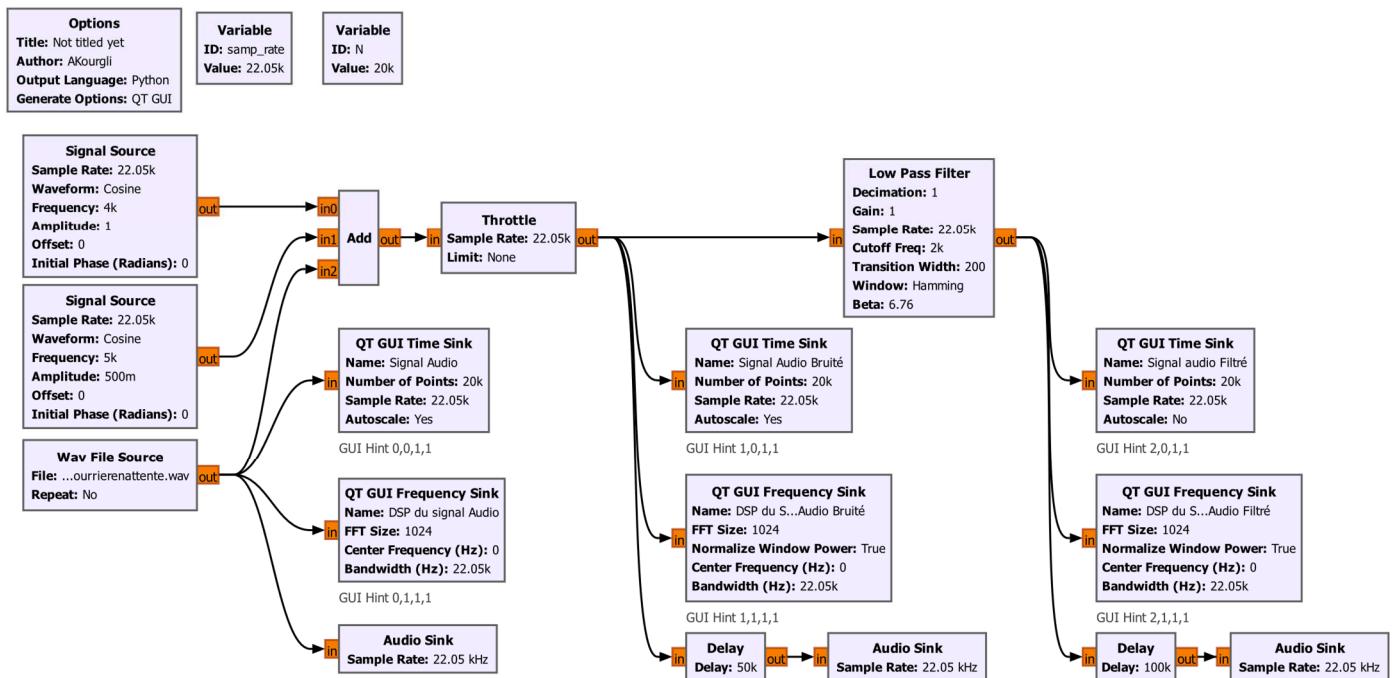
- Inputs : 3
- Spectrum Width : Full
- FFT Size : 1024
- Center Frequency (Hz) : 0
- Bandwidth : samp_rate

Connecter la sortie de Signal Source, puis celle du Low Pass Filter

- Explique le rôle de chaque bloc.
- Expliquer le rôle de chaque paramètre de Low pass filter → Documentation → Visit Documentation Page.
- Faire de même pour QT GUI Time Sink et QT GUI Frequency Sink.
- Faire varier la puissance du bruit et observer.
- Retravailler le schéma en utilisant : Virtual Sink et Virtual Source pour chacun des 3 signaux.
- Explorer le rôle des boutons sur le menu :



3. Manipulation 2 : Débruitage d'un signal Audio → Flowgraph à réaliser



- Copier le fichier audio 'vous avez du courrier en attente.wav' dans le répertoire de travail.
- Explique le rôle de chaque bloc.
- Utiliser les commentaires placé en dessous des blocs pour la répartition des figures.
- Exécuter et commenter.

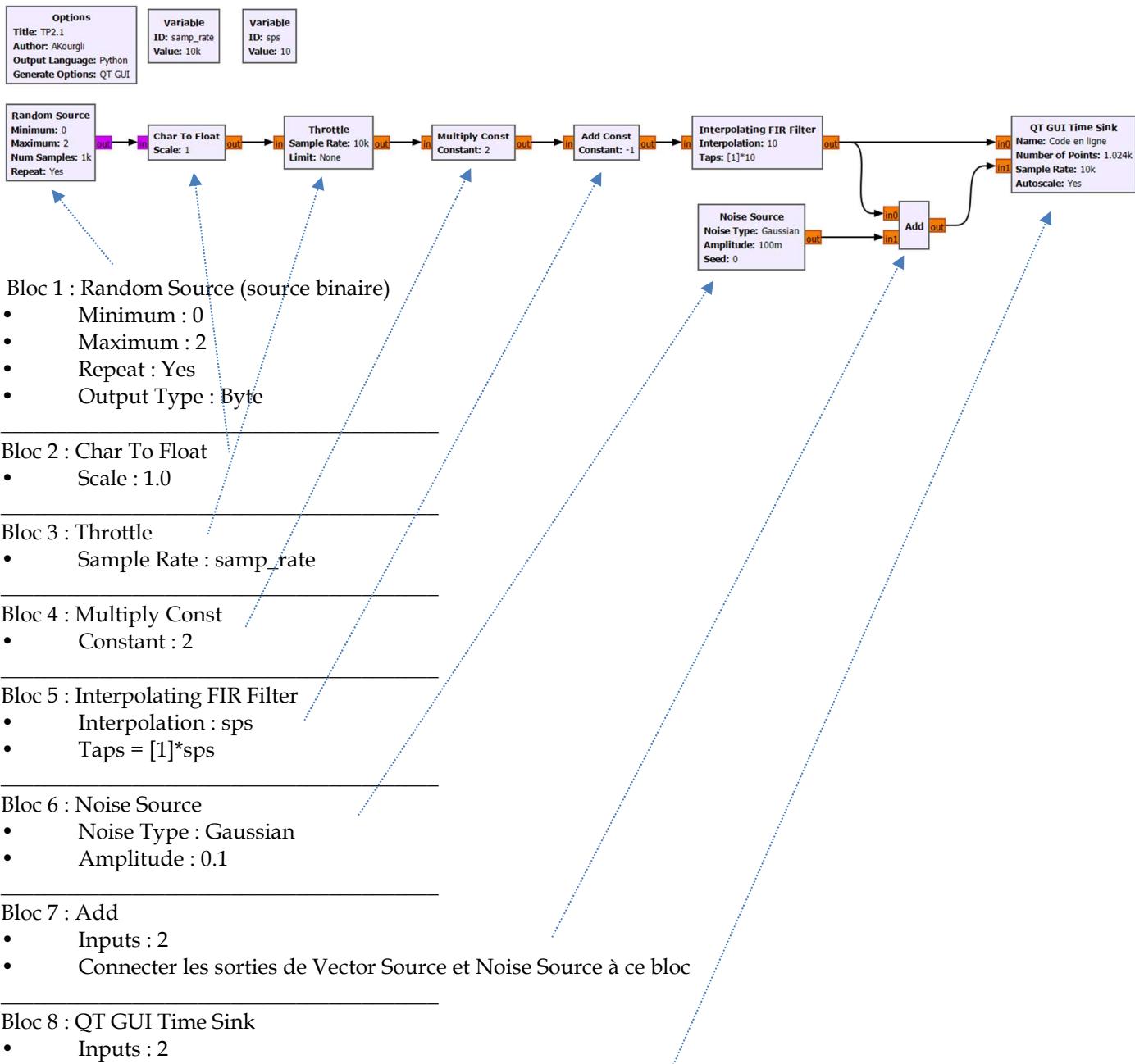
TP n°2 : Codage en ligne

But du TP : Explorer les différentes techniques de codage en ligne (NRZ, RZ, Manchester, M-aire)

Objectifs pédagogiques :

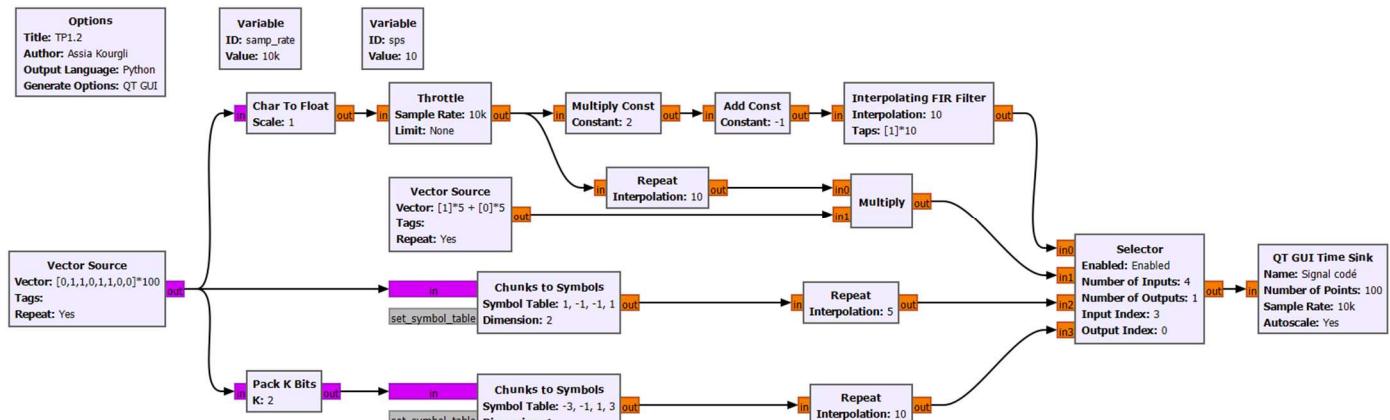
- Implémenter des schémas de codage en ligne adaptés aux transmissions numériques.
- Visualiser la structure temporelle des codes binaires.
- Analyser la densité spectrale de puissance de chaque code.
- Comparer les performances et l'efficacité spectrale.

1. Manipulation 1 : Visualisation d'une séquence binaire bruitée → Flowgraph à réaliser



- Expliquer le rôle de chaque bloc.
- QT GUI Time Sink → Config → Control Panel = Yes.
- Changer valeur de 'sps' et observer.
- Changer Number of points → 100 et observer
- Quel est le rôle de ce flowgraph ?

2. Manipulation 2 : Génération de codes en ligne indépendants → Flowgraph à réaliser



Variables : samp_rate = 10kHz et sps = 10

Vector Source (binaire)

→ Char to Float

→ Throttle (limite le débit)

→ 4 branches codage (NRZ, RZ, Manchester, M-aire)

→ Selector (choix du codage actif : input_index = 0 ou 1 ou 2 ou 3)

→ QT GUI Time Sink (visualisation) (Autoscale = Yes)

Branche NRZ polaire (Non-Return to Zero)

- Multiply Const (valeur = 2) Donne 0 → 0, 1 → 2

- Add Const (valeur = -1) Décale → 0 → -1, 1 → +1

- Interpolating FIR Filter Taps = [1]*sps, Interp = sps → étire chaque bit sur 'sps' échantillons

- Selector (entrée 0)

Branche RZ unipolaire (Return to Zero)

- Repeat (N = sps) Chaque bit devient 'sps' échantillons

- Multiply avec Vector Source (valeurs [1]*5 + [0]*5) Applique la forme RZ

- Selector (entrée 1)

Branche Manchester

- Map ou Chunks to Symbols Map : [1, -1, -1, 1]

- Dimension : 2 → Map : 0 → [1, -1], 1 → [-1, 1]

- Repeat (N = sps//2) Étire chaque demi-bit

- Selector (entrée 2)

Branche M-aire (ex : 4-aire)

- Pack K bits K=2 → Groupe les bits (2 par 2)

- Chunks to Symbols Map 00,01,10,11 → -3, -1, +1, +3

- Dimension : 1

- Repeat (N = sps) Étire chaque symbole

- Selector (entrée 3)

- Prendre Number of points = 100 et calculer Tb et Ts pour chaque code.
- Remplacer le block Vector Source (binaire) → Random Uniform Source (min=0 et max =2).
- Ajouter un bloc QT GUI Frequency Sink pour visualiser la DSP.
- Pour chaque code comparer les DSPs obtenues avec celles calculées théoriquement.
- Modifier le flowgraph pour visualiser les codes NRZ unipolaire, RZ polaire, 8-Aires.

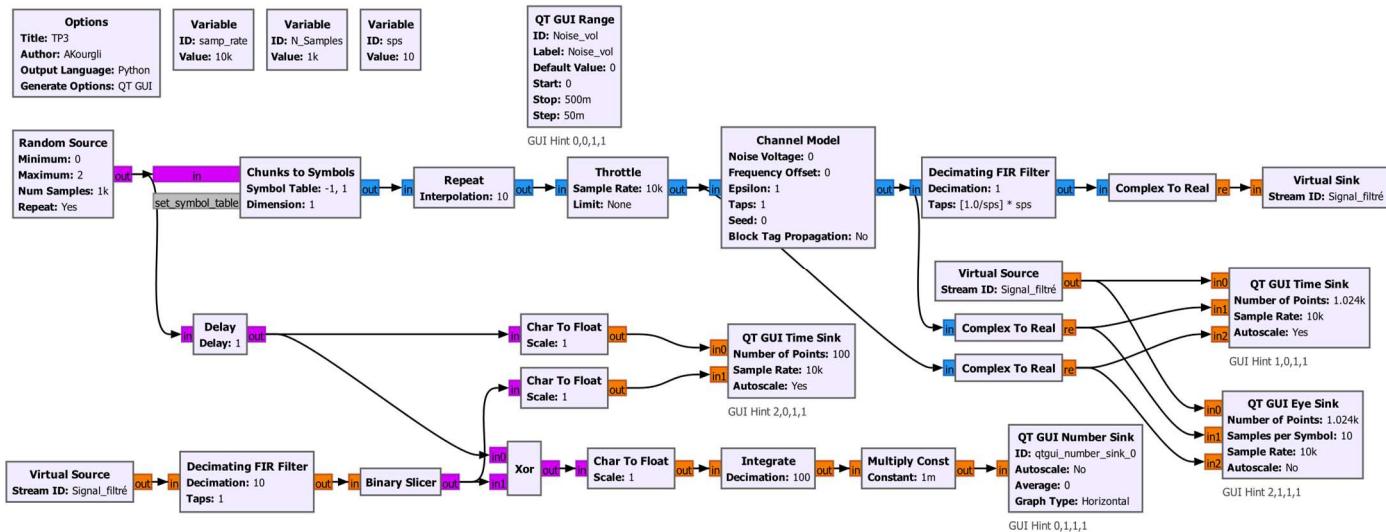
TP n°3 : Transmission en bande base et Récepteur optimal

But du TP : Comprendre les effets du bruit sur une transmission en bande de base et étudier le rôle du filtrage adapté dans la détection optimale.

Objectifs pédagogiques :

- Construire une chaîne de transmission de bout en bout.
- Identifier les blocs de mise en forme et de filtrage adapté.
- Observer les effets du bruit sur la forme d'onde et le BER.
- Expérimenter l'impact de la limitation spectrale du canal.

1. Manipulation 1 : Transmission sur un canal AWGN illimité → Flowgraph à réaliser



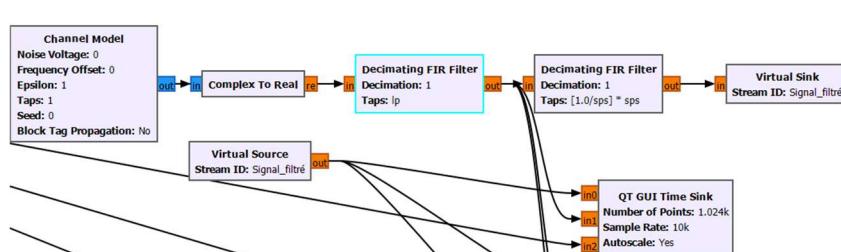
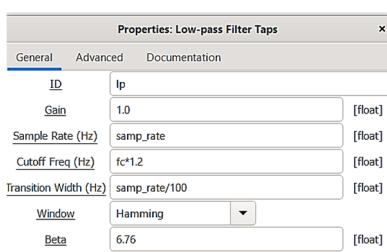
- Explique brièvement le rôle de chaque bloc.
- Quel est le code binaire employé ?
- Identifier le bloc qui joue le rôle de filtre de mise en forme et déterminer Tb.
- Identifier le bloc qui joue le rôle de filtre adapté
- Pourquoi a-t-on pris la de valeur de Taps de $[1.0/sps] * sps$ dans le 1^{er} bloc de Decimation filter ?
- Pourquoi a-t-on ajouté un delay de 1 à la séquence binaire ?
- Identifier les 3 graphes utilisés dans le 1^{er} bloc QT GUI Time Sink en mettant les bons titres dans Config.
- Faire de même pour le 2^{ème} QT GUI Time Sink.
- Pourquoi a-t-on pris une valeur de sps pour Decimation dans le 2^{ème} bloc de Decimation filter ?
- Pourquoi a-t-on pris une valeur de sps//2 pour sample delay dans le 2^{ème} bloc de Decimation filter ?
- Augmenter la puissance du bruit (en haut sur le graphe time sink/Widget =Entry+slider) et observer la valeur du BER.
- Augmenter la puissance du bruit et observer les diagrammes de l'œil.

2. Manipulation 2 : Transmission sur un canal AWGN à bande limitée → Flowgraph à réaliser

Pour simuler un canal à bande limité on ajoute un filtre passe-bas à la sortie du canal → Le signal reçu est maintenant récupéré à la sortie du filtre passe-bas.

- Ajouter une variable $fc = samp_rate / (2 \text{ sps})$ correspondant à $1/(2 \text{ Tb})$
 - Ajouter un filtre passe-bas après le bloc Channel Model avec fc et Transition Width = $samp_rate/100$.
- Pour ce faire :

1. Générer un bloc qui contient les spécifications du filtre passe-bas comme suit :



- Donner lui un identifiant : lp par exemple, puis ajouter un bloc Decimating FIR Filter en tapant dans Tps : lp
2. Récupérer le signal reçu à la sortie du filtre et non plus à la sortie du canal (Changer source de la flèche du milieu).
 3. Créer une variable qui donne la longueur de filtre passe-bas ajouté Len_lp : len(lp)

- Observer le décalage entre les bits émis et reçus puis ajuster la valeur de Delay : int((Len_lp)/2/sps)+1.
- Observer l'effet sur le signal reçu et expliquer le changement de forme.
- Observer l'effet sur le BER et le diagramme de l'œil.
- Ajouter un QT GUI Frequency Sink pour visualiser les 3 DSPs et observer l'effet de la limitation du canal.
- En déduire si le filtre placé de réception précédemment défini est toujours adéquat ? adapté ?
- Prendre Cuttof Freq : fc*1.2 puis fc* 0.8 et observer à nouveau l'effet le BER et le diagramme de l'œil.
- En déduire la condition sur la bande de fréquence minimale permettant d'avoir un œil ouvert.
- Prendre une puissance de bruit nulle et Cuttof Freq : fc*1.2. Vérifier la présence des interférences affectant le BER.
- Que faut-il faire pour réduire les interférences ?
- Expliquer pourquoi cette valeur de retard 'int((Len_lp)/2/sps)+1'.

TP n°4 : Transmission en bande base sur un canal limité sans IES

But du TP : Réaliser une transmission sans intersymbol interference (IES) en utilisant des filtres en cosinus surélevés (RRC) en émission et en réception.

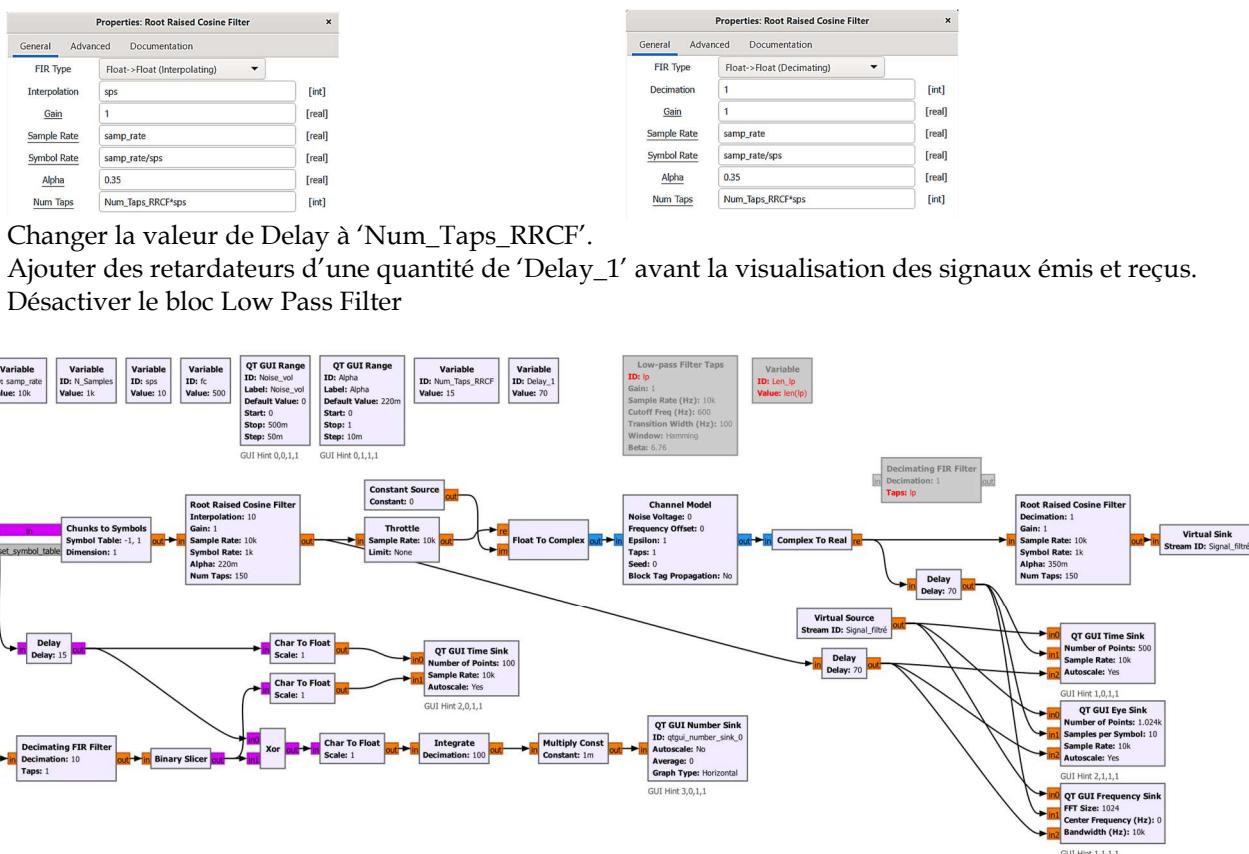
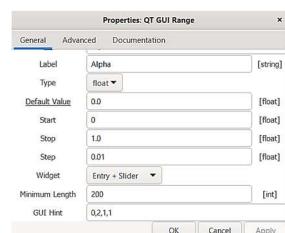
Objectifs pédagogiques :

- Comprendre le critère de Nyquist pour éviter les IES.
- Implémenter un filtrage RRC symétrique.
- Observer les effets du roll-off (α) et du bruit sur la qualité du signal.
- Ajuster dynamiquement les délais pour synchroniser les signaux.

1. Manipulation 1 : Transmission sur un canal AWGN sans IES → Flowgraph à réaliser

Reprendre le 2^{ème} flowgraph du précédent TP.

1. Ajouter un QT Gui Range permettant de varier alpha sur le time sink.
2. Ajouter les variables suivantes :
- Num_Taps_RRCF : 11
- Delay_1 : int(Num_Taps_RRCF*sps/2)
3. Ajouter les blocs suivants : Le 1^{er} remplacera le bloc repeat et le 2^{ème} remplacera le bloc decimating filter.



- Expliquer le rôle de 'Num_Taps_RRCF'.
- Observer l'occupation spectrale des 3 signaux et expliquer.
- Observer l'effet d'une amplitude de bruit de 0.1 sur le diagramme de l'œil des signaux reçus et filtrés.
- Augmenter le bruit progressivement (sur le graphe) et observer l'effet sur le BER et le diagramme de l'œil.
- Varier la valeur de alpha (sur le graphe) et observer l'impact sur les 3 affichages. Essayer aussi 0 et 1
- Expliquer la valeur de delay de 'Num_Taps_RRCF+int((Len_lp)/2/sps)' appliquée à la séquence binaire ?

2. Manipulation 2 : Transmission sur un canal AWGN limité sans IES → Flowgraph à réaliser

Reconnecter le bloc Decimation FIR Filter (Taps :lp) et ajuster :

- Delay : 'Num_Taps_RRCF+int((Len_lp)/2/sps)'.
- Delay_1 : 'int(Num_Taps_RRCF/2)*sps' avant visualisation des signaux émis et reçus
- Delay_2 : 'int(Len_lp/2)+Delay_1' avant visualisation des signaux émis et reçus
- Récupérer le signal reçu à la sortie du filtre ajouté
- Faire varier la fréquence de coupure du filtre de Cuttof Freq : fc*1.2 puis fc* 0.8 et observer l'effet sur les diagrammes de l'œil et le BER.

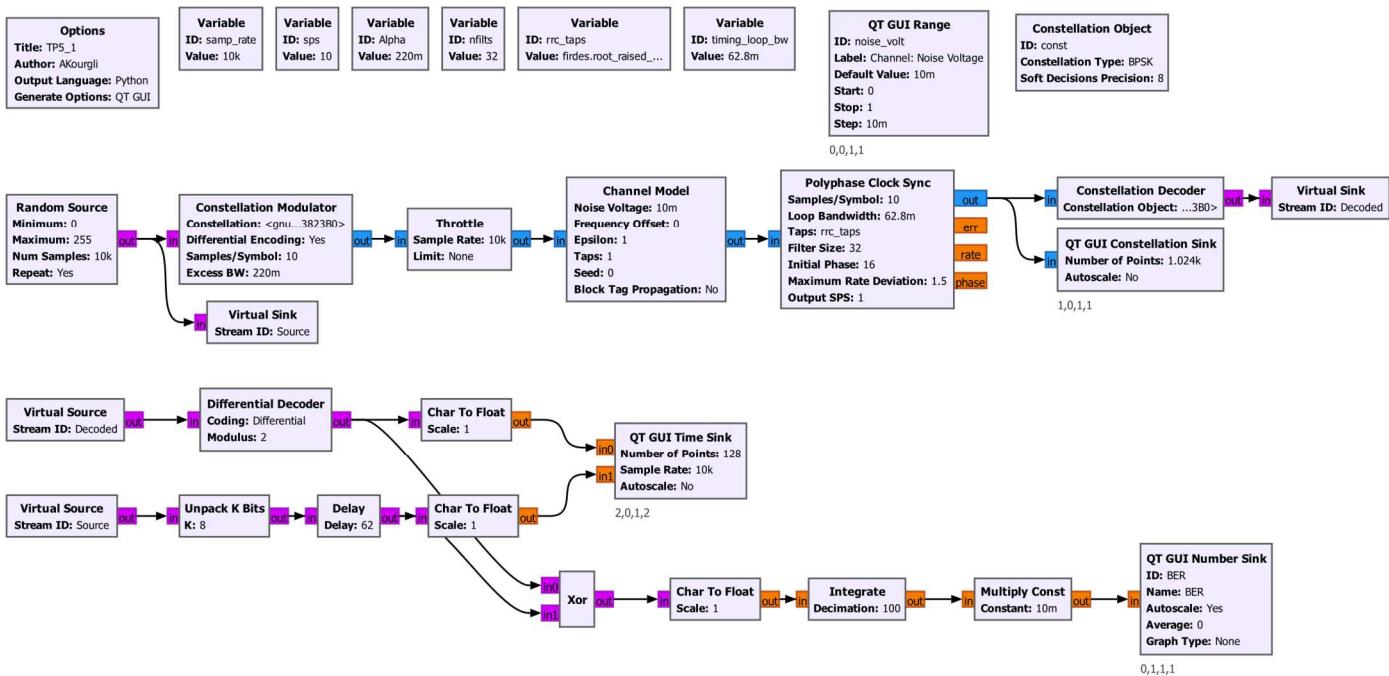
TP n°5 : Modulation Numérique

But du TP : Mettre en pratique les modulations M-ASK, M-PSK, M-QAM et M-FSK et observer leur propriétés.

Objectifs pédagogiques :

- Générer des modulations M-aires avec différents schémas.
- Visualiser la constellation des modulations.
- Analyser leur efficacité spectrale et sensibilité au bruit.
- Comparer les performances via le BER.

1. Manipulation 1 : Modulation 2-ASK/ BPSK → Flowgraph à réaliser



Contenu des variables Delay et rrc-taps

- Delay : $\text{int}(5.5 * \text{sps} + 7)$
- rrc_taps : $\text{firdes.root_raised_cosine}(\text{nfilters}, \text{nfilters}, 1.0/\text{float}(\text{sps}), \text{Alpha}, 11*\text{sps}*\text{nfilters})$
- timing_loop_bw : 0.0628

Paramètres des blocs

Properties: Constellation Object

General		Advanced	Documentation
ID	const		
Constellation Type	BPSK		
Soft Decisions Precision	8	[int]	
Noise Power	1.0	[float]	
Soft Decisions LUT	None		

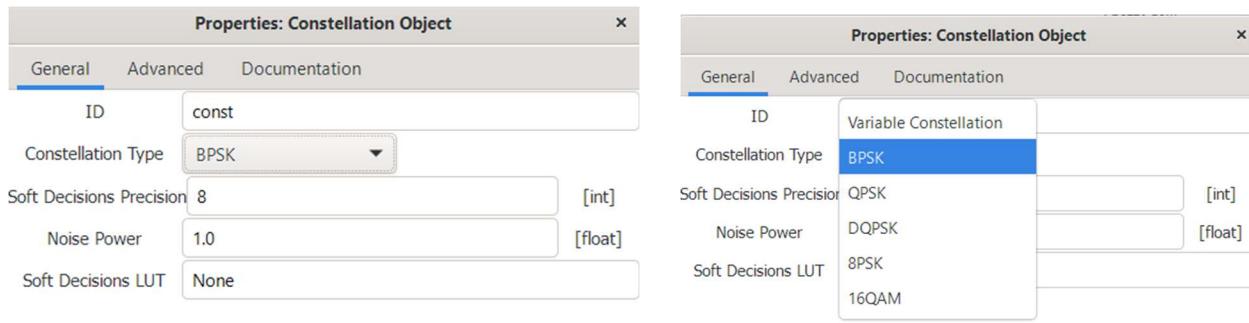
Properties: Constellation Modulator

General		Advanced	Documentation
Constellation	const		
Differential Encoding	Yes	[bool]	
Samples/Symbol	sps	[int]	
Excess BW	Alpha	[real]	
Verbose	Off	[bool]	
Log	Off	[bool]	
Truncate Filter Transient	No	[bool]	

Properties: Polyphase Clock Sync

General		Advanced	Documentation
Type	Complex->Complex (Real Taps)		
Samples/Symbol	sps	[real]	
Loop Bandwidth	timing_loop_bw	[real]	
Taps	rrc_taps	[real_vector]	
Filter Size	nfilters	[int]	
Initial Phase	nfilters/2	[real]	
Maximum Rate Deviation	1.5	[real]	
Output SPS	1	[int]	

- Considérer le bloc Constellation Object et les 5 modulations possibles :

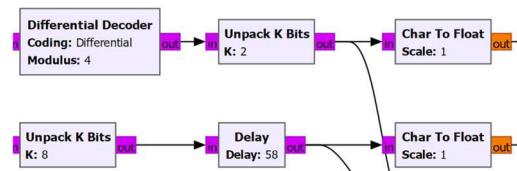


- Considérer les autres nouveaux blocs en déterminant leurs rôles : Constellation modulator, Polyphase Clock Sync, Constellation Decoder, Differential Decoder.
- Faire varier le bruit et observer l'impact sur les constellations et le BER
-

2. Manipulation 2 : Modulation M-PSK → Flowgraph à réaliser

- Modifier le flowgraph précédent pour obtenir une QPSK.

- Modifier Constellation object → QPSK.
- Modifier Modulus → 4.
- Ajouter un bloc Unpack K bits (K : 2) à placer comme ci-contre.
- Multiplier le delay par 2 → $(int(5.5 * sps + 7)*2$
- Observer le BER lorsque que la puissance du bruit augmente.



- Modifier le flowgraph précédent pour obtenir une 8-PSK

- Modifier Constellation object → 8PSK
- Modifier Modulus → 8
- Ajouter un bloc Unpack K bits (K : 3).
- Observer le BER lorsque que la puissance du bruit augmente.
- Multiplier le delay par 2 → $(int(5.5 * sps + 7)*3$

- Consulter https://wiki.gnuradio.org/index.php/Constellation_Rect_Object

3. Manipulation 3 : Modulation M-QAM → Flowgraph à réaliser

Modifier le flowgraph précédent pour obtenir une 16-QAM

- Modifier Constellation object → 16QAM
- Modifier Modulus → 16
- Ajouter un bloc Unpack K bits (K : 4).
- Observer le BER lorsque que la puissance du bruit augmente.
- Multiplier le delay par 2 → $(int(5.5 * sps + 7)*4$

4. Manipulation 4 : Modulation M-FSK → Flowgraph à réaliser

Glossaire

- Additive White Gaussian Noise (AWGN) = Bruit Additif Blanc et Gaussien (BABG)
- Autocorrelation function = Fonction d'autocorrélation
- Autocovariance function = Fonction d'autocovariance
- Bandwidth = Largeur de bande
- Baseband signal = Signal en bande de base
- Binary data rate = Débit binaire
- Bit Error Rate (BER) = Taux d'Erreur Binaire (TEB)
- Digital communications = Communications Numériques
- Energy per bit = Énergie par bit
- Energy per symbol = Énergie par symbole
- Excess bandwidth = Largeur de bande en excès
- Eye diagram = Diagramme de l'oeil
- Fourier transform = Transformation de Fourier
- Hypothesis testing = Test d'hypothèses
- Inter Symbol Interference (ISI) = Interférence Entre Symboles (IES)
- Matched filter = Filtre adapté
- Maximum A Posteriori decoding (MAP) = Décodage au sens du Maximum A Posteriori (MAP)
- Maximum Likelihood decoding (ML) = Décodage à Maximum de Vraisemblance (MV)
- Modulation order = Ordre de modulation
- Modulation rate = Rapidité de modulation
- Passband signal = Signal sur fréquence porteuse
- Pulse Amplitude Modulation (PAM) = Modulation par Impulsions d'Amplitude (MIA)
- Pulse shape = Filtre de mise en forme
- Raised cosine = Cosinus surélevé
- Roll-off factor = Facteur de Roll off
- Sampling theorem = Théorème d'échantillonnage
- Signal to Noise Ratio (SNR) = Rapport Signal sur Bruit (RSB)
- Spectral efficiency = Efficacité spectrale
- Spectrum = Spectre Power Spectral Density (PSD) = Densité Spectrale de Puissance (DSP)
- Stationary process = Processus stationnaire
- Stochastic process = Processus aléatoire
- Symbol duration = Durée des symboles
- Symbol error probability = Probabilité d'erreur par symbole
- Threshold decision = Décision à seuil
- Wide-sense stationary process = Processus stationnaire au seconde ordre