Table des matières

[Introduction 2](#_Toc516744121)

[1. Émetteur 4](#_Toc516744122)

[1.1. Le message initial (source) 4](#_Toc516744123)

[1.2. Codage du message 5](#_Toc516744124)

[1.3. La mise en forme du signal 6](#_Toc516744125)

[1.3.1. Modulation ASK 7](#_Toc516744126)

[1.3.2. Filtre en cosinus surélevé 7](#_Toc516744127)

[1.3.3. Sur-échantillonnage 9](#_Toc516744128)

[2. Canal 10](#_Toc516744129)

[2.1. Le bruit AWGN 10](#_Toc516744130)

[2.2. L’atténuation du signal 10](#_Toc516744131)

[2.3. Le délai de transmission 10](#_Toc516744132)

[3. Récepteur 10](#_Toc516744133)

# Introduction

**Énoncé du projet**

Dans le cadre du cours de télécommunication 1ère année de Master, il a été demandé aux élèves de simuler, à l'aide du logiciel Matlab, une chaîne de transmission numérique multi-utilisateurs destinée à fonctionner sur un réseau câblé. Notons que, d’un point de vue strictement fonctionnel, nous ne devons prendre en compte que la couche physique du système. En effet, l'un des émetteurs produit un flux binaire qui doit être transmis par des moyens adéquats à l'un des récepteurs situés sur le réseau. Par conséquent, la signification des bits envoyés, le partage d'une même ressource physique par plusieurs utilisateurs et l'implémentation des différents modules au moyen de composants électroniques (circuits physiques) ne seront pas pris en compte dans le cadre de ce travail. Nous considérons le système comme correct si le flux binaire transmis est reproduit à la sortie du récepteur de destination.

Pour rappel, l'objectif de la simulation est de permettre la variation de différents paramètres du système et d'en observer les réactions. Dans le cas où le modèle de notre chaîne de transmission numérique refléterait convenablement le système physique (réduction au maximum du nombre d'erreurs), nous pourrions analyser les performances de celui-ci. Ainsi, nous pourrions réaliser des gains de temps et de coûts considérables tout en évitant l'implémentation du système physique.

Par conséquent, la puissance d'émission nécessaire ou la bande-passante du signal transmis seront des paramètres importants à prendre en compte dans le cadre de ce travail. En effet, tout écart des performances par rapport à la théorie, lors du développement d'un système de télécommunication, ne peut être négligé.

* En d'autres mots, la simulation est donc une excellente option pour se rapprocher au plus près possible des résultats réels tout en évitant de devoir mettre en place un système physique.

**Étapes du projet**

Afin de réaliser une simulation complète, nous devons découper le travail en trois étapes selon le principe d’une transmission numérique. Chronologiquement, nous avons donc réalisé :

1. L’émetteur ;
2. Le canal ;
3. Le récepteur ;

**Topologie du réseau**

Suivant les consignes données, nous considérons un canal multi-utilisateur (ou, plus simplement, un câble partagé) auquel un ensemble de K modules sont rattachés en différents points. Chaque module est géré par un utilisateur déterminé et ceux-ci bénéficient de N ressources physiques, caractérisées par une bande de fréquences déterminée et découpée en deux niveaux :

* Un premier niveau d’accès multiple, implémenté au niveau de la couche physique par la méthode de réparation en fréquences ;
* Comme K > N, un second niveau d’accès multiple, implémenté au niveau du protocole. Plusieurs utilisateurs devront en effet se partager ces ressources. Ce second niveau ne concernant pas la couche physique, il ne sera pas abordé dans le cadre de ce travail. Par conséquent, nous considérons toujours que K N lors de nos simulations.

Ainsi, nous utilisons une bande de fréquences déterminée sur le canal partagé ou « canal fréquentiel » :

Chaque module aura à tout moment la possibilité d’effectuer deux opérations simultanées :

* La transmission ou non d’un signal sur un des N canaux fréquentiels ;
* La réception d’un signal sur l’ensemble des N canaux fréquentiels.

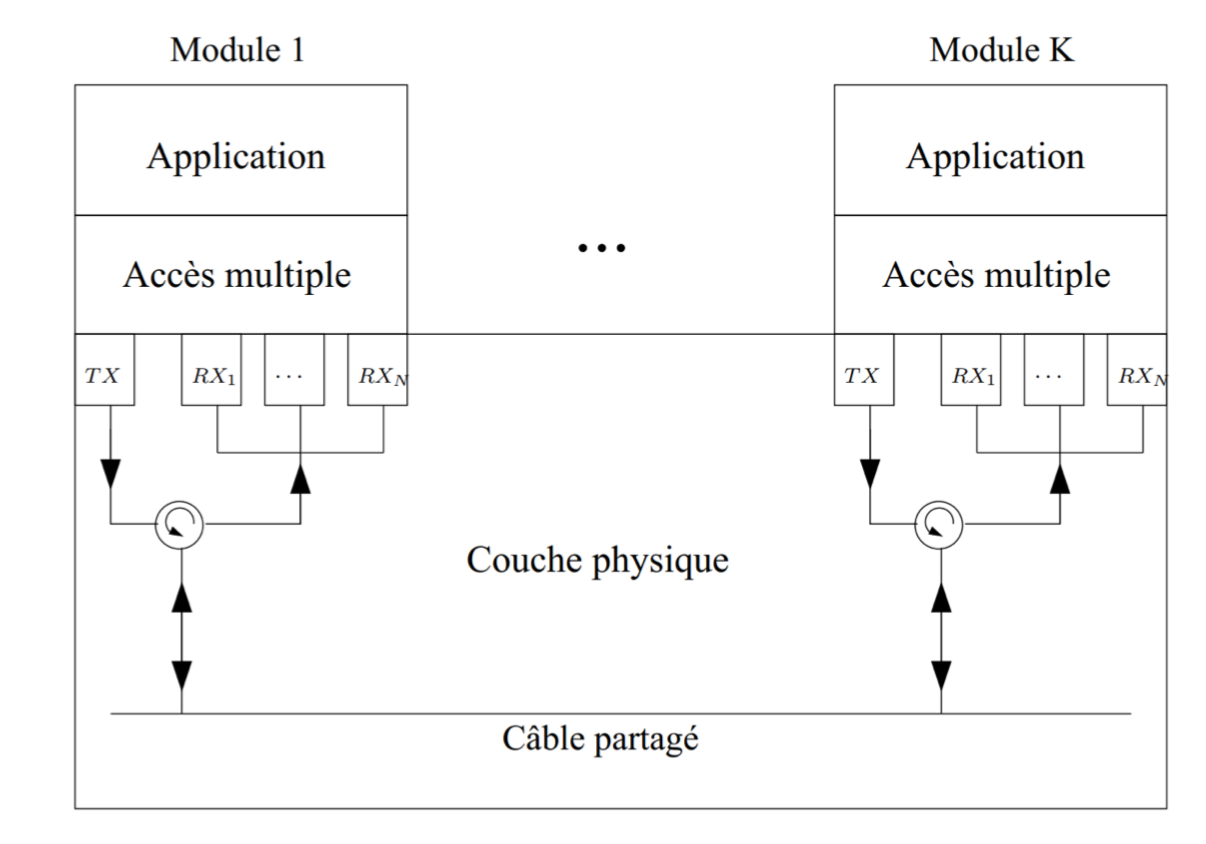


Figure 1: Topologie du réseau avec son modèle en couches

Nous attirons l’attention sur le fait que la rédaction de ce rapport s’appuie essentiellement sur les notions théoriques vues au cours de télécommunications 1ère année master (année 2017-2018). Ainsi, ce rapport reprend certaines figures tirées des slides du cours (c’est-à-dire du livre de référence « *Communications Systems* » de *Simon Haykin*) et constitue une bonne synthèse de la matière parcourue.

# Émetteur

Dans le domaine des télécommunications, comme partout ailleurs, pour que 2 interlocuteurs puissent communiquer ensemble, chacun doit être capable **d’émettre l’information** qu’il souhaite transmettre. Sans cela, aucun échange de données ne peut exister. C’est donc cette notion qu’il convient de définir en premier lieu. Le schéma-bloc (figure 2) ci-dessous reprend les notions générales à définir concernant l’émetteur :



Figure 2 - schéma bloc présentant les différents éléments intervenant dans l'émetteur.

Le schéma-bloc représenté à la figure 3 ci-dessous est celui utilisé pour la réalisation de l’émetteur dans le projet.



Figure 3 - Schéma bloc de l'émetteur utilisé (avec les différentes notations utilisées).

## Le message initial (source)

Un message est une suite de données/d’informations variant au cours du temps : on peut donc représenter un message par une fonction du temps. Selon la source, cette fonction peut être un signal analogique ou numérique. L’énoncé de l’exercice stipule que le message est directement émis sous forme numérique, c’est-à-dire sous forme binaire.

La propagation du message au travers du canal de communication peut prendre différentes formes : signal électrique, signal électromagnétique, signal lumineux, … Dans notre cas, la transmission de l’information se réalise via un support physique (câble partagé), nous utiliserons donc un signal électrique. Ce signal électrique est représenté par 2 états correspondant aux bits d’informations (par exemple : 5V-GND ⬄ 1-0).

* *Ainsi, nous considérons que le message est directement défini sous* ***forme binaire*** *(suite de 0 et 1). Chaque message, généré aléatoirement, possède une* ***taille fixe M*** *(en bits) et un* ***débit R*** *(en bits/s), soit une durée de secondes par bits.*

L’émetteur peut émettre de l’information sur le canal à n’importe quel instant : on parle de communication **asynchrone**. Dans ce type de communication, il est de rigueur de définir un format de trame. Ce format contient généralement :

* 1 bit de *start* pour prévenir le récepteur que le message est en cours d’envoi ;
* 8 bits (ou plus) représentant les données à transmettre ;
* 1 bit de *stop* pour indiquer que les données ont été transmises ;
* 1 bit de parité pour détecter les éventuelles erreurs de transmission ;
* ...

Dans notre cas, il n’est pas demandé d’implémenter de protocole de communication et nous ne devons donc pas définir de format de trame. Nous définirons néanmoins une séquence de synchronisation pour permettre au récepteur de synchroniser son instant d’échantillonnage avec l’émetteur.

* *Ainsi, la trame sera constituée d’une suite de 5 bits à ‘1’ (constituant la* ***séquence de synchronisation****) suivi d’une suite aléatoire de bits ‘0’et ‘1’ (constituant le message).*

La figure 2 ci-dessous est tirée du logiciel MATLAB. Elle représente le message dans sa forme « initiale », c’est-à-dire contenant une séquence de synchronisation suivi de données aléatoires.

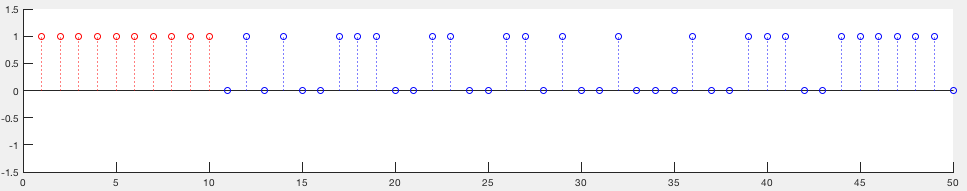


Figure 4 - Message originale (séquence synchronisation en rouge - message en bleu).

## Codage du message

Avant que le signal ne soit envoyé sur le canal de communication, celui-ci doit être codé. On distingue 2 types de codage : le codage de source et le codage de canal.

* Le but principal du *codage de source* est de **comprimer au maximum la source d’information** pour permettre une **communication efficace**. Ainsi, le codage de source transforme le signal binaire d’entrée en une forme la plus économique possible en termes de nombres de bits.
* Le but principal du *codage de canal* est de **protéger le système contre les erreurs dues au bruit** pour permettre une **communication fiable**. Ainsi, le codage de canal ajoute des informations permettant de reconstituer le message initial malgré les erreurs éventuelles causées par le bruit de canal.
* Selon l’énoncé du projet, le codage utilisé est simple : il s’agit d’un codage de lignes et plus spécifiquement du codage bipolaire NRZ. On transforme la séquence de bits de départ en nouvelle séquence comme ceci :

Après l’étape du codage, on a généré une nouvelle séquence discrète. En théorie, chaque élément de cette séquence est appelé ***symbole*** est peut-être associé à un ou plusieurs bits issus de la source d’informations. De cette manière, après le codage, on définit un second débit, le débit des symboles, qui est le nombre de symboles transmis par unité de temps : on parle de *bauds*. Dans notre cas, on utilise un codage binaire (2 niveaux), représentés par les symboles 1 et -1. Ainsi, à 1 bit correspond 1 symbole. Autrement dit, la taille du message avant et après le codage n’a pas changée (taille M). De même, le débit est resté identique (débit R).

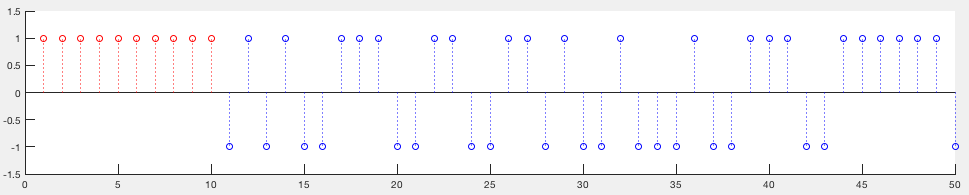
La figure 3 ci-dessous reprend le codage réalisé sur la même séquence de bits que la figure 1.

Figure 5 - Message codé code polaire NRZ).

## La mise en forme du signal

Notre message initial binaire a été transformé en nouvelle séquence de -1 et 1 grâce au *codage*. Si on se réfère à la figure 2, l’étape qui suit le codage dans l’émission du message concerne la mise en forme de ce dernier. On distingue 2 points dans la mise en forme des données :

1. *La modulation* : La modulation transforme la séquence binaire en signal continu selon une porteuse oscillant à une certaine fréquence. Cette fréquence de la porteuse représente ainsi le canal sur lequel les données seront transmises.
2. *Le filtre de mise en forme* : le filtre de mise en forme limite la bande passante du signal émis. Ceci permet ainsi de délimiter les différents canaux sur le médium de transmission.

Le signal continu en sortie de bloc de mise en forme doit avoir pour équation :



Où :



* représente donc la fonction de mise en forme du signal. Elle est composée du ***filtre de mise en forme***  ainsi que la ***porteuse*** . Nous noterons que la fréquence de la porteuse, représentant le canal sur lequel l’information va être envoyée, est définie par . Enfin, un **amplificateur de gain A** permettra d’ajuster la puissance du signal au niveau prévu.

La porteuse est clairement définie : il s’agit d’une fonction en cosinus.

En revanche, concernant le filtre de mise en forme, il faut définir la fonction . Ce filtre de base est un filtre de type « racine de Nyquist », c’est-à-dire tel que représente un filtre de Nyquist. Dans l’énoncé du projet, il est précisé que ce filtre doit être un **filtre en cosinus surélevé**.

### Modulation ASK

La modulation ASK (**A**mplitude **S**hift **K**eying) établit la correspondance entre les symboles et la forme d’onde caractérisée par :

Où

( représentant le gain en puissance souhaité).

Cette modulation permet ainsi, via une porteuse sinusoïdale, d’émettre l’information sur une canal particulier fonction de la fréquence choisie **.**

La figure ci-dessous représente le principe de la modulation ASK. On remarque bien que l’amplitude de la porteuse varie selon les symboles transmis (dans ce cas-ci 0 ou 1).

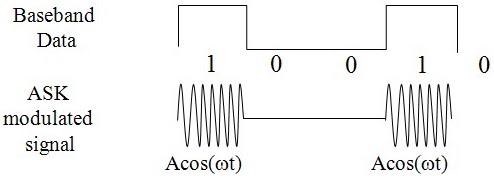
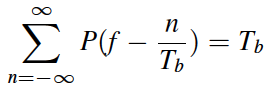
****

Figure 6 - Principe de la modulation ASK.

### Filtre en cosinus surélevé

Pourquoi utiliser un filtre en cosinus surélevé ? Pour expliquer le filtre en cosinus surélevé, nous avons besoin d’introduire le critère de Nyquist afin de définir le filtre de Nyquist idéal.

***Le critère de Nyquist*** est une expression mathématique exprimée dans le domaine fréquentielle (on peut aussi la définir dans le domaine temporel mais c’est préférable dans le domaine fréquentiel) comme ceci :



Cette expression indique que si le canal global p(t), composé de la mise en cascade du filtre d’émission, du canal physique, et du filtre de réception, a un spectre P(f) satisfaisant le critère de Nyquist (expression ci-dessus), alors les échantillons du canal enregistrés à une cadence 1/Tb sont exemptés d’interférence entre symboles.

* En conclusion, ce critère permet d’assurer une réception parfaite des données émises en l’absence de bruit (or, comme on le verra dans la section suivante, notre canal induit toujours du bruit).

***Le filtre de Nyquist idéal*** est un filtre dont la représentation spectrale est rectangulaire. Il est caractérisé par une bande passante W :

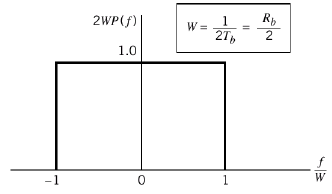


Figure 7 - Filtre de Nyquit idéal représenté dans le domaine fréquentiel.

Dans le domaine temporel, cette impulsion rectangulaire correspond à la fonction sinus cardinal (obtenue par transformée de Fourier inverse) :

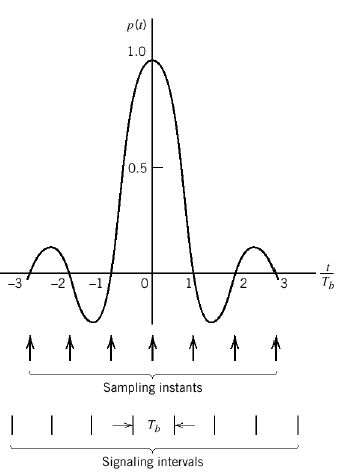


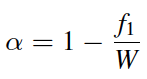
Figure 8 - Filtre de Nyquist idéal représenté dans le domaine temporel.

Cependant, il y a 2 grands inconvénients à ce filtre de Nyquist idéal :

1. Premièrement, un tel filtre est *irréalisable en pratique*. En effet, lorsqu’on visualise la forme rectangulaire dans le domaine spectrale, on ne peut pas délimiter la bande passante du filtre de façon aussi abrupte.
2. Deuxièmement, si l’on visualise le domaine temporel, l’impulsion p(t) décroît lentement, ce qui qui provoque une *dégradation importante des performances en cas d’erreurs de timing*.

* La solution pour résoudre ces 2 inconvénients est : le ***filtre en cosinus surélevé***. Ce filtre est constitué d’une partie plate et d’une partie dite de « rolloff » de forme sinusoïdale.

Pour distinguer ces 2 parties (plate et de rolloff), on définit le ***facteur de rolloff (.*** Ce facteur représente la bande passante en excès par rapport à W (qui correspond à la bande passante du filtre de Nyquist idéal). Son expression est la suivante :



Avec

Dès lors, au plus augmente, au plus la bande passante totale s’élargit. De cette manière, le 1er inconvénient cité précédemment est résolu. Plus précisément, la bande passante total a pour équation :



La figure ci-dessous représente les différentes formes obtenues en faisant varie le facteur de rolloff.

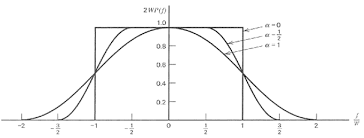
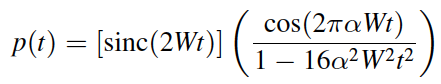


Figure 9 - Représentation fréquentielle du filtre en cosinus surélevé.

Pour comprendre comment le second inconvénient est résolu, nous devons nous intéresser au domaine temporel. Dans le domaine temporel, l’équation du filtre en cosinus surélevé est la suivante :



Dans cette équation :

* Le 1er facteur est un sinus cardinal. Ce facteur représente donc l’impulsion de Nyquist idéale. Ce qui permet d’assurer le passage par 0 aux instants adéquats.
* Le 2ème facteur est caractérisé par une décroissance en . Ce qui permet de réduire l’importance (hauteur) de la queue de l’impulsion. Ceci permet donc d’être plus robuste aux erreurs de timing.
* Conclusion : La bande passante requise et la robustesse à l’encontre des erreurs de timing augmentent quand le facteur de rolloff évolue depuis 0 vers 1. Dans le cas particulier où le facteur de rolloff vaut 1, la robustesse à l’encontre des erreurs de timing est optimale cependant le prix à payer est que la bande passante est dans ce cas 2 fois plus élevée comparativement au filtre de Nyquist idéal.

### Sur-échantillonnage

# Canal

Notre émetteur étant opérationnel, nous devons maintenant être en mesure de transmettre l’information au(x) destinataire(s). Pour ce faire, nous avons besoin d’un **support de transmission**. Dans le domaine des télécommunications, ce support est appelé « médium ». Il peut se présenter sous différentes formes : câbles physiques, ondes électromagnétiques, … Dans cette section, nous allons aborder les caractéristiques essentielles d’un canal de communication permettant d’assurer la transmission des données.

## Le bruit AWGN

## L’atténuation du signal

## Le délai de transmission

# Récepteur

Dans la section 1, nous avons défini les caractéristiques de l’émetteur afin *d’émettre* une information. Dans la section 2, nous avons aborder les caractéristiques du canal afin de pouvoir transmettre des données. Dans cette section, nous allons voir comment les **données** sont **réceptionnées** et décodées afin d’être compréhensibles pour le destinataire. Pour ce faire, nous avons besoin d’un **récepteur**.