

Communications numériques

Transmission en bande de base

Laurent Oudre
laurent.oudre@univ-paris13.fr

Université Paris 13, Institut Galilée
Ecole d'ingénieurs Sup Galilée
Parcours Informatique et Réseaux Apprentissage - 2^{ème} année
2017-2018

Sommaire

Introduction

- Emetteur
- Canal
- Récepteur
- Hypothèses du cours

Emission d'un signal en bande de base

Transmission sur un canal à bande passante infinie en absence de bruit

Transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie

Transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée

Sommaire

Introduction

- Emetteur
- Canal
- Récepteur
- Hypothèses du cours

Emission d'un signal en bande de base

- Conversion bits/symboles
- Filtre de mise en forme
- Puissance et énergies moyennes
- Densités spectrale de puissance

Transmission sur un canal à bande passante infinie en absence de bruit

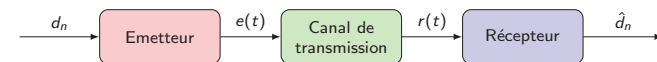
- Hypothèses
- Interférences entre symboles
- Réception en absence de bruit

Transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie

- Hypothèses
- Récepteur optimal
- Réception en présence de bruit

Transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée

Chaîne de transmission idéale : rappel



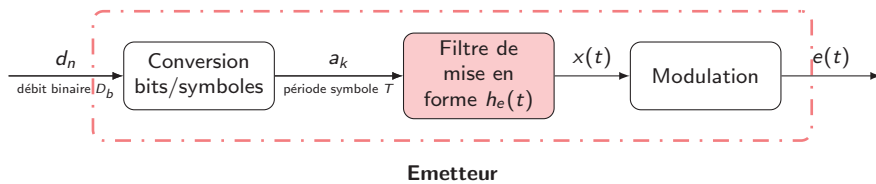
Chaîne de transmission idéale : emetteur



Emetteur : transformer le signal numérique d_n en un signal physique $e(t)$ (onde électromagnétique, signal électrique, etc...) qui puisse être transmis sur le canal de transmission

- ▶ Transmettre le maximum de données avec une fiabilité maximale
- ▶ S'adapter au canal de transmission utilisé

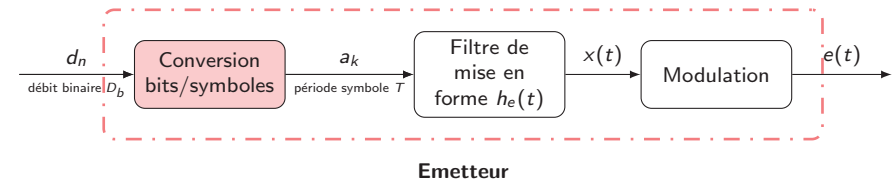
Emetteur : différentes étapes



Mise en forme :

- ▶ Transformation du signal numérique en un signal physique
- ▶ Choix du filtre de mise en forme dépend de la largeur de bande souhaitée, de la présence de raies à la fréquence d'horloge...

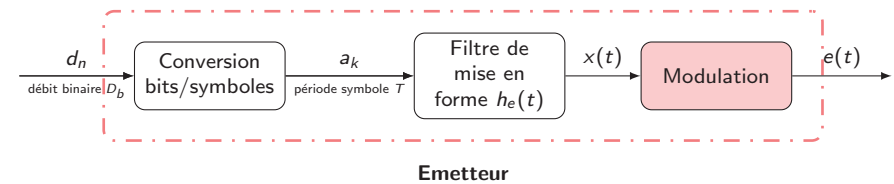
Emetteur : différentes étapes



Conversion bits/symboles (transcodage) :

- ▶ Modification de la taille de l'alphabet
- ▶ Modification du rythme

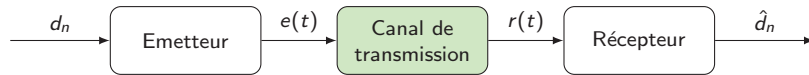
Emetteur : différentes étapes



Modulation :

- ▶ Adaptation au canal de transmission (bande passante)
- ▶ Large choix de possibilités : dépend de la puissance, de la probabilité d'erreur acceptable...

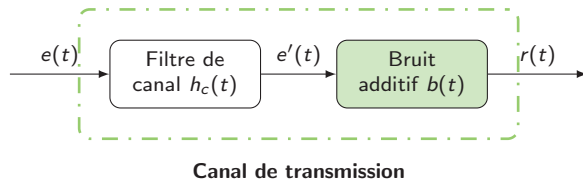
Chaîne de transmission idéale : canal



Canal de transmission : câbles coaxiaux, paires torsadées, réseau hertzien, infrarouge, fibres optiques,....

- ▶ Propriétés physiques différentes selon le canal utilisé : bande passante, débit maximal, etc...
- ▶ Eventuellement source d'erreurs (bruit, perte de données, etc...)

Canal : différentes étapes

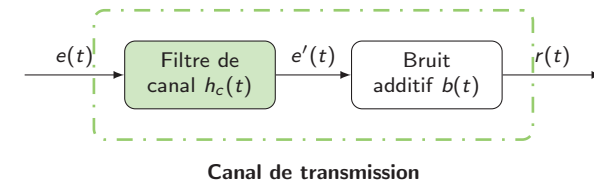


Bruit additif $b(t)$

- ▶ Souvent supposé bruit blanc additif gaussien indépendant du signal

$$\Gamma_b(f) = \frac{N_0}{2}$$

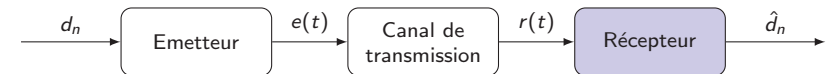
Canal : différentes étapes



Filtre de canal ayant pour fonction de transfert $H_c(f)$

- ▶ Dépend à priori de la fréquence : notion de **bande passante** du canal
- ▶ Canal idéal : $H_c(f)$ constant dans la bande passante

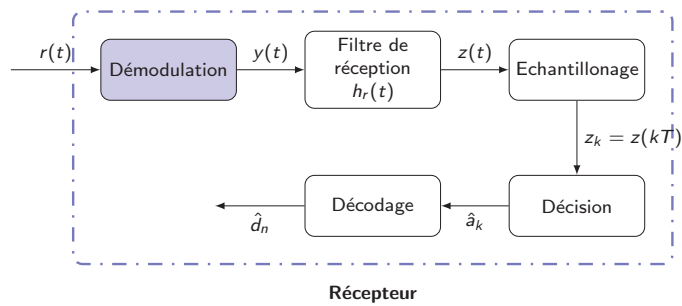
Chaîne de transmission idéale : récepteur



Récepteur : transformer le signal physique reçu $r(t)$ pour retrouver le signal numérique envoyé \hat{d}_n

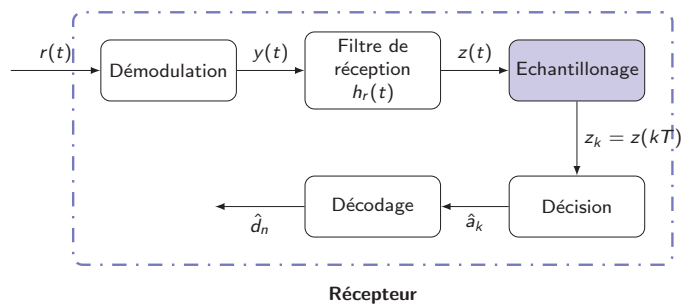
- ▶ Echantillonnage, détection, élimination du bruit
- ▶ Parfois difficile s'il y a eu des erreurs de transmission

Récepteur : différentes étapes



Démodulation : inverse de l'étape de modulation

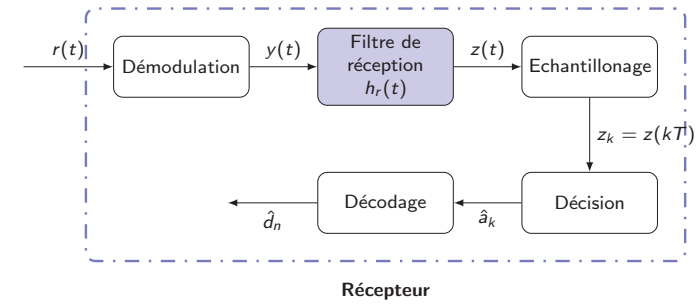
Récepteur : différentes étapes



Echantillonnage :

- ▶ Transformation du signal physique en signal discret
- ▶ Nécessite une synchronisation sur le temps d'horloge

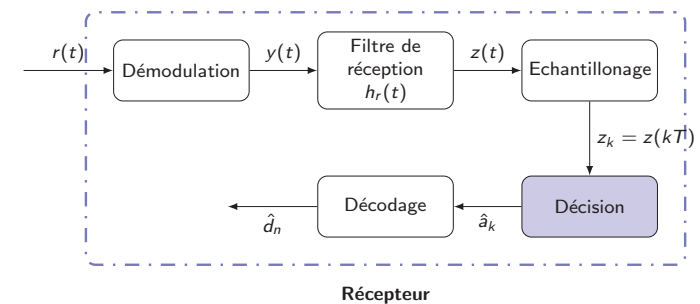
Récepteur : différentes étapes



Filtre de réception :

- ▶ Adapté au filtre de mise en forme utilisé lors de l'émission
- ▶ Vise à minimiser les interactions entre symboles et à maximiser le rapport signal sur bruit

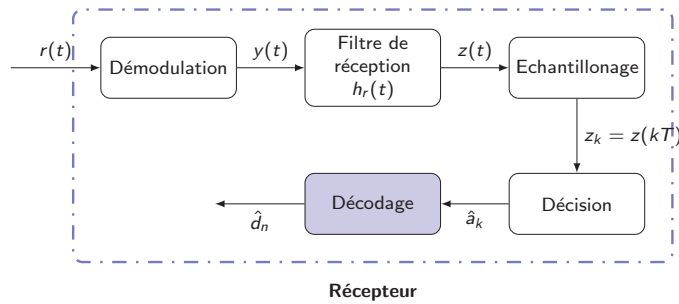
Récepteur : différentes étapes



Décision :

- ▶ A partir des valeurs échantillonnées, on retrouve les symboles émis
- ▶ Sensible au bruit ajouté par le canal

Récepteur : différentes étapes



Décodage : on transforme les symboles détectés en bits d'information

Sommaire

Introduction

Emission d'un signal en bande de base

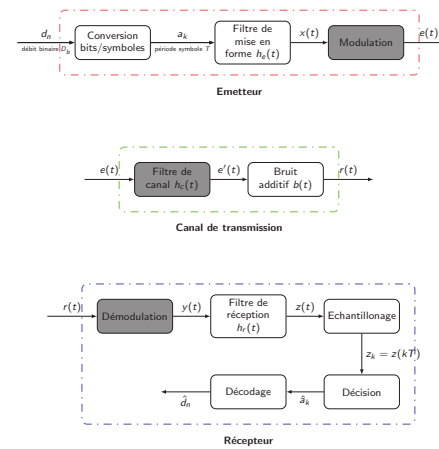
- Conversion bits/symboles
- Filtre de mise en forme
- Puissance et énergies moyennes
- Densités spectrale de puissance

Transmission sur un canal à bande passante infinie en absence de bruit

Transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie

Transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée

Hypothèses



On s'intéresse ici à la transmission en bande de base :

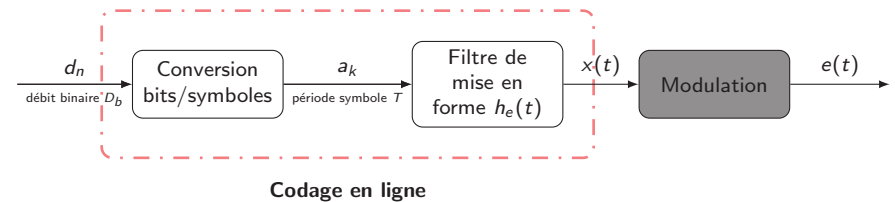
- ▶ Pas d'étape de modulation/démodulation
- ▶ Transmission des signaux tels quels, dans la bande de fréquence originale

On suppose aussi que le canal utilisé est idéal, invariant, et de gain unitaire

$$H_c(f) = 1$$

Sa bande passante est donc supposée infinie.

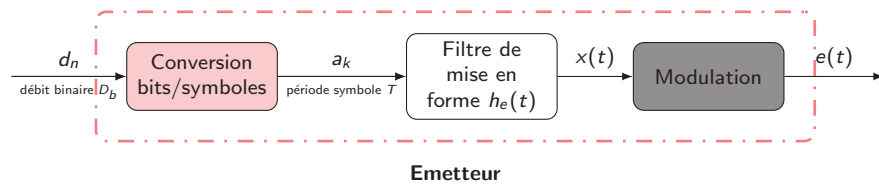
Codage en ligne



Codage en ligne :

- ▶ Toutes les étapes en bande de base, avant l'étape de modulation
- ▶ But : donner de bonnes propriétés au signal physique créé (largeur de bande, raies ou annulations du spectre à certaines fréquences, etc...)

Emetteur : conversion bits/symboles



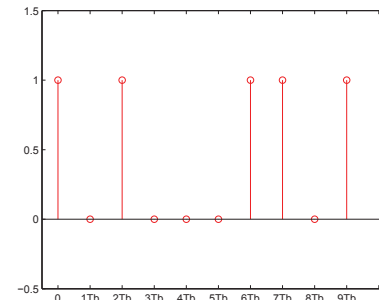
Conversion bits/symboles (transcodage) :

- ▶ Modification de la taille de l'alphabet
- ▶ Modification du rythme

Transcodage : conversion bits/symboles

- ▶ Principe : remplacer les bits ou des groupements de bits par des symboles
- ▶ Idée : passer de deux valeurs possibles (0 ou 1) à M valeurs possibles
- ▶ Plusieurs façons de procéder :
 - ▶ Codage par dictionnaire : regrouper les bits m par m et associer un symbole à chaque groupement
 - ▶ Codage par diagramme d'états
 - ▶ Codage par équation linéaire

Débit binaire



- ▶ Entrée : signal binaire initial d_n

$$d = 1010001101 \dots$$

- ▶ Un bit émis toutes les T_b secondes. T_b est la période binaire.

- ▶ **Débit binaire :**

$$D_b = \frac{1}{T_b} \text{ (bits/seconde)}$$

Le débit binaire D_b correspond au nombre de bits envoyés par seconde.

$$d(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} d_n \delta(t - nT_b) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} d_n \delta\left(t - \frac{n}{D_b}\right)$$

Codage par dictionnaire

- ▶ **m est le nombre de bits par symbole**
- ▶ Regrouper les bits m par m et associer un symbole à chaque groupement
- ▶ On peut définir un dictionnaire de M symboles.

$$M = 2^m$$

$$m = \log_2 M$$

- ▶ **M est le nombre de symboles du dictionnaire et est appelé valence**

- ▶ Exemple avec $m = 1$:

$$1010001101 \rightarrow 1010001101 \rightarrow 1-11-1-1-111-11$$

- ▶ Exemple avec $m = 2$:

$$1010001101 \rightarrow 1010001101 \rightarrow 22031$$

Codage par dictionnaire

- ▶ Plusieurs façons d'attribuer un symbole a_k à chaque groupe de m bits

- ▶ Codage M-aire unipolaire :

$$a_k \in \{0, 1, \dots, M-1\}$$

- ▶ Codage M-aire antipolaire :

$$a_k \in \{-(M-1), \dots, -3, -1, 1, 3, \dots, M-1\} \text{ (uniquement les valeurs impaires)}$$

- ▶ Exemple avec $m = 2$:

$$10 \ 10 \ 00 \ 11 \ 01 \longrightarrow 2 \ 2 \ 0 \ 3 \ 1 \text{ (unipolaire)}$$

$$10 \ 10 \ 00 \ 11 \ 01 \longrightarrow 3 \ 3 \ -3 \ 1 \ -1 \text{ (antipolaire)}$$

Exemples

- ▶ Codage quaternaire antipolaire (ou 2B1Q)

$d_n d_{n+1}$	a_k
00	-3
01	-1
11	1
10	3

codage de Grey : un bit de différence entre chaque état

Exemples

- ▶ Codage binaire unipolaire

d_n	a_k
0	0
1	1

- ▶ Codage binaire antipolaire

d_n	a_k
0	-1
1	1

Rapidité de modulation

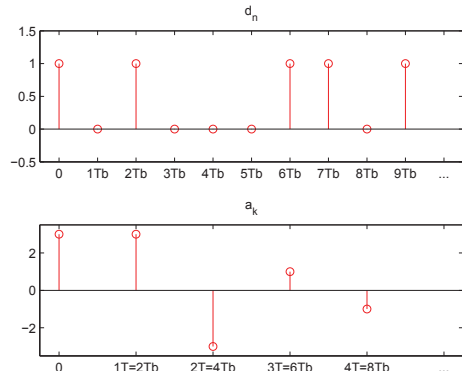
- ▶ Si on regroupe les bits m par m , on transmet m fois moins vite.
- ▶ **On appelle période symbole T la période d'émission des symboles a_k**

$$T = mT_b = \log_2 M T_b = \frac{\log_2 M}{D_b}$$

- ▶ On a un nouveau signal

$$a(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \delta(t - kT)$$

Exemple : codage 2B1Q



10 10 00 11 01 \rightarrow 3 3 -3 1 -1

Mise en forme

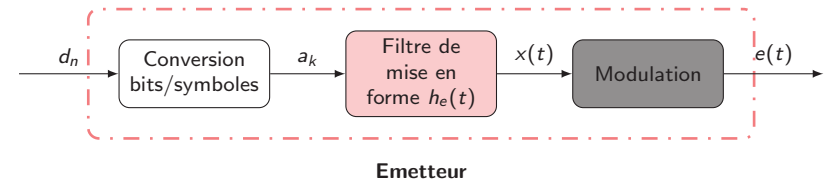
- ▶ Entrée : suite de symboles M-aires a_k . Un symbole émis toutes les T secondes

$$a(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \delta(t - kT)$$

- ▶ Principe : associer un signal physique $x(t)$ à cette suite de symboles en convoluant $a(t)$ par la réponse impulsionnelle $h_e(t)$ d'un filtre de mise en forme (aussi appelé filtre d'émission).
- ▶ Codes à formant : même filtre de mise en forme pour tous les symboles

$$x(t) = a(t) * h_e(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k h_e(t - kT)$$

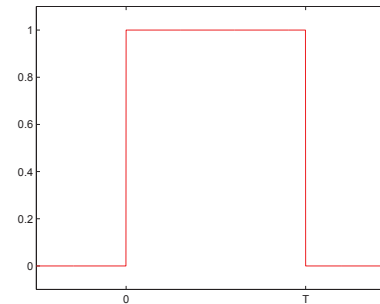
Emetteur : mise en forme



Mise en forme :

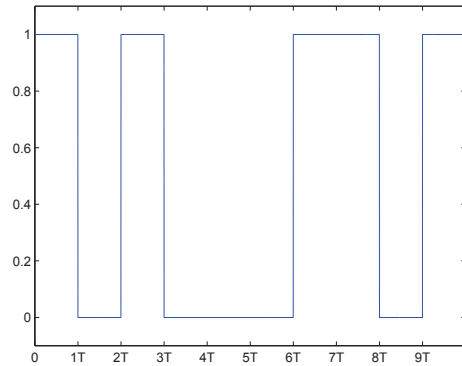
- ▶ Transformation du signal numérique en un signal physique
- ▶ Choix du filtre de mise en forme dépend de la largeur de bande souhaitée, de la présence de raies à la fréquence d'horloge...

Filtre NRZ (non retour à zéro)



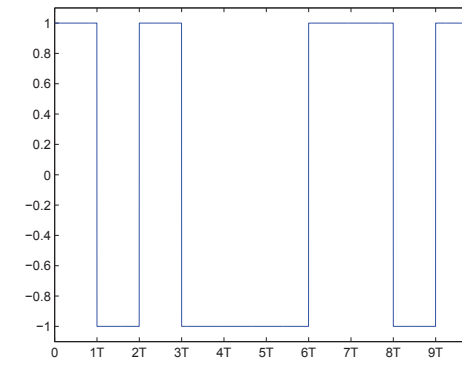
$$h_e(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t < T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Exemple : Codage binaire unipolaire NRZ



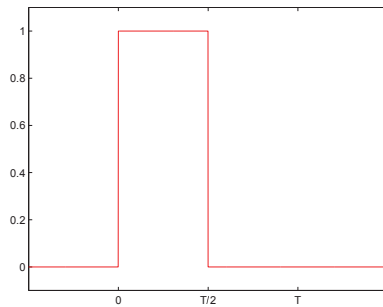
1010001101 → 1010001101

Exemple : Codage binaire antipolaire NRZ



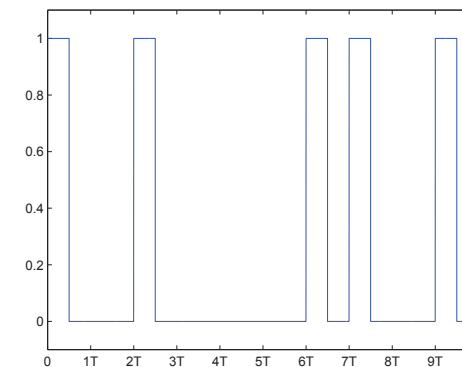
1010001101 → 1-11-1-1-111-11

Filtre RZ (retour à zéro)



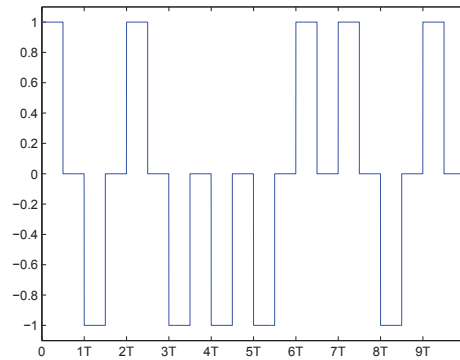
$$h_e(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Exemple : Codage binaire unipolaire RZ



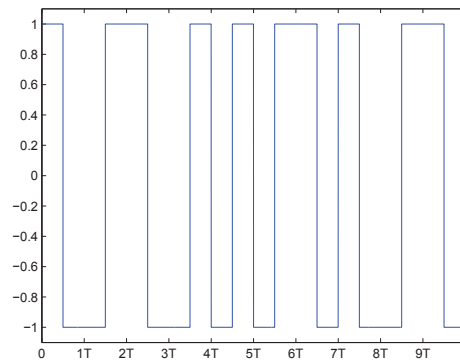
1010001101 → 1010001101

Exemple : Codage binaire antipolaire RZ



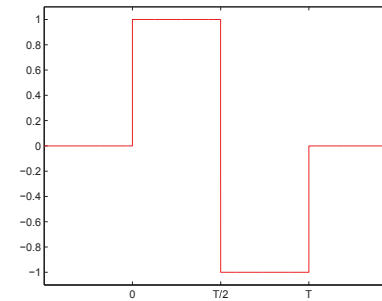
1010001101 → 1-11-1-1-111-11

Exemple : Codage binaire antipolaire Manchester



1010001101 → 1-11-1-1-111-11

Filtre biphasé Manchester



$$h_e(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ -1 & \text{si } \frac{T}{2} \leq t < T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Bilan

Notions importantes

- ▶ D_b : débit binaire
- ▶ T : période symbole
- ▶ m : nombre de bits par symbole
- ▶ M : valence = nombre de symboles du dictionnaire

Emission en bande de base

- ▶ 3 dictionnaires privilégiés : binaire unipolaire, binaire antipolaire, 2B1Q
- ▶ 3 filtres d'émission : NRZ, RZ, biphasé Manchester

Notion d'énergie

- ▶ Comment évaluer l'énergie totale du signal en bande de base $x(t)$?

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k h_e(t - kT) \right|^2 dt$$

- ▶ Si le support temporel de $h_e(t)$ est égal à T , on a :

$$E_x = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |a_k|^2 \int_{-\infty}^{\infty} |h_e(t - kT)|^2 dt = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |a_k|^2 E_{h_e}$$

- ▶ Problème : on ne connaît pas les a_k a priori car ils sont aléatoires !
- ▶ Solution : au lieu de définir une énergie totale, on va définir une **énergie moyenne**

Energie moyenne par symbole

En notant μ_a et σ_a^2 respectivement la moyenne et la variance des symboles du dictionnaire, on peut remarquer que :

$$\begin{aligned} \sigma_a^2 &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |a_i - \mu_a|^2 \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |a_i|^2 - \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M |a_i| |\mu_a| + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\mu_a|^2 \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |a_i|^2 - |\mu_a|^2 \end{aligned}$$

Donc on a aussi :

$$E_{sym} = (\sigma_a^2 + |\mu_a|^2) E_{h_e}$$

Energie moyenne par symbole

- ▶ L'énergie correspondant à l'émission d'un seul symbole a_i est

$$E_{a_i} = \int_{-\infty}^{\infty} |a_i h_e(t)|^2 dt = |a_i|^2 E_{h_e}$$

- ▶ Si l'on suppose que tous les symboles du dictionnaire sont équiprobables, l'énergie moyenne par symbole peut donc être définie comme

$$E_{sym} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_{a_i} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |a_i|^2 E_{h_e}$$

- ▶ **L'énergie moyenne par symbole E_{sym} correspond à l'énergie moyenne nécessaire pour envoyer un symbole**
- ▶ Comme un symbole correspond à $m = \log_2 M$ bits, on peut aussi définir l'énergie moyenne par bit comme

$$E_{bit} = \frac{E_{sym}}{\log_2 M} = \frac{1}{M \log_2 M} \sum_{i=1}^M |a_i|^2 E_{h_e}$$

- ▶ **L'énergie moyenne par bit E_{bit} correspond à l'énergie moyenne nécessaire pour envoyer un bit**

Exemples

- ▶ Exemple : dictionnaire binaire antipolaire

$$E_{sym} = E_{bit} = \frac{1}{2} ((-1)^2 + (1)^2) E_{h_e} = E_{h_e}$$

- ▶ Exemple : dictionnaire 2B1Q

$$E_{sym} = \frac{1}{4} ((-3)^2 + (-1)^2 + (1)^2 + (3)^2) E_{h_e} = 5 E_{h_e}$$

$$E_{bit} = \frac{E_{sym}}{\log_2 4} = \frac{5}{2} E_{h_e}$$

Notion de puissance

- ▶ Chaque symbole est émis durant une période T , donc on peut définir la puissance moyenne totale du signal $x(t)$ comme

$$P_x = \frac{E_{sym}}{T}$$

- ▶ De la même façon, on peut définir la puissance moyenne totale du signal $x(t)$ comme

$$P_x = \frac{E_{bit}}{T_b} = E_{bit} D_b$$

- ▶ **La puissance émise moyenne P_x correspond à la puissance moyenne nécessaire pour envoyer un signal en bande de base**

Propriétés spectrales des signaux en bande de base

$$\Gamma_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T} |H_e(f)|^2 + \frac{\mu_a^2}{T^2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left| H_e\left(\frac{k}{T}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T}\right)$$

- ▶ **La densité spectrale de puissance $\Gamma_x(f)$ correspond à la répartition de la puissance du signal $x(t)$ en fonction de la fréquence**
- ▶ Le dictionnaire utilisé influence μ_a et σ_a^2 : en particulier, si $\mu_a \neq 0$, on fait apparaître sur la DSP des raies fréquentielles aux fréquences multiples de $\frac{1}{T}$
- ▶ Le filtre de mise en forme utilisé conditionne la forme de la DSP : en particulier, lorsque l'on utilise un filtre NRZ, RZ ou biphase Manchester, on obtient un signal en bande de base, où la majorité de la puissance est répartie dans la bande $[-B, +B]$ où B est la largeur de bande du signal.
- ▶ Comme nous le verrons en Travaux Pratiques, à débit binaire constant, le dictionnaire et le filtre utilisés impactent directement la largeur de bande du signal

Densité spectrale de puissance

- ▶ Le signal $x(t)$ est un signal aléatoire dont l'aspect fréquentiel doit donc être étudié grâce à une densité spectrale de puissance
- ▶ Il correspond au filtrage du signal aléatoire $a(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \delta(t - kT)$ par un filtre de fonction de transfert $H_e(f)$, sa densité spectrale de puissance $\Gamma_x(f)$ vérifie donc :

$$\Gamma_x(f) = |H_e(f)|^2 \Gamma_a(f)$$

- ▶ Si les symboles sont supposés équiprobables et indépendants, on a :

$$\Gamma_a(f) = \frac{\sigma_a^2}{T} + \frac{\mu_a^2}{T^2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{k}{T}\right)$$

- ▶ Et donc :

$$\Gamma_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T} |H_e(f)|^2 + \frac{\mu_a^2}{T^2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left| H_e\left(\frac{k}{T}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T}\right)$$

Liens entre les notions de puissance

- ▶ Nous avons défini *avec les mains* la puissance moyenne totale P_x du signal $x(t)$ comme étant :

$$P_x = \frac{E_{sym}}{T} = \frac{\sigma_a^2 + |\mu_a|^2}{T} E_{he}$$

- ▶ D'un autre côté, nous savons que par définition, on a :

$$P_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_x(f) df$$

- ▶ Ces deux expressions sont-elles compatibles ?

Liens entre les notions de puissance

- ▶ Prenons le cas simple d'un dictionnaire antipolaire
- ▶ On a donc $\mu_a = 0$ et dans ce cas, la définition avec les mains nous donne :

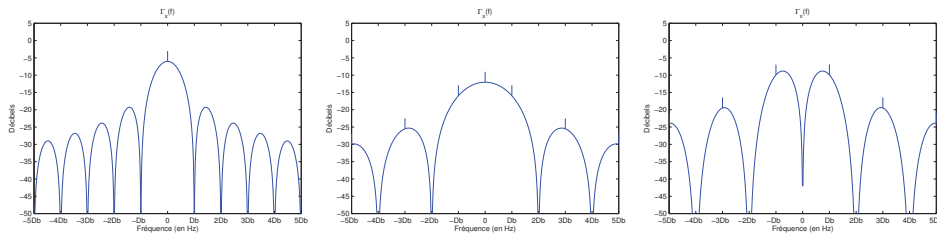
$$P_x = \frac{E_{sym}}{T} = \frac{\sigma_a^2}{T} E_{he}$$

- ▶ En faisant le calcul à partir de la DSP, on trouve :

$$\begin{aligned} P_x &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_x(f) df \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_a^2}{T} |H_e(f)|^2 df \\ &= \frac{\sigma_a^2}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_e(f)|^2 df \\ &= \frac{\sigma_a^2}{T} E_{he} \end{aligned}$$

- ▶ Les deux définitions sont donc parfaitement cohérentes !

Quelques DSP des codes en ligne



Filtre NRZ
 $B \approx D_b \approx \frac{1}{T}$

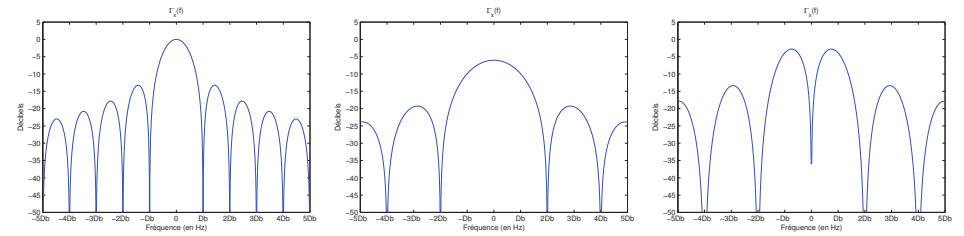
Filtre RZ
 $B \approx 2D_b \approx \frac{2}{T}$

Filtre Manchester
 $B \approx 2D_b \approx \frac{2}{T}$

$D_b = 1$ bit/seconde, $M = 2$, dictionnaire unipolaire

Idem au dictionnaire antipolaire, mais apparition de raies fréquentielles pour $f = \frac{k}{T}$

Quelques DSP des codes en ligne



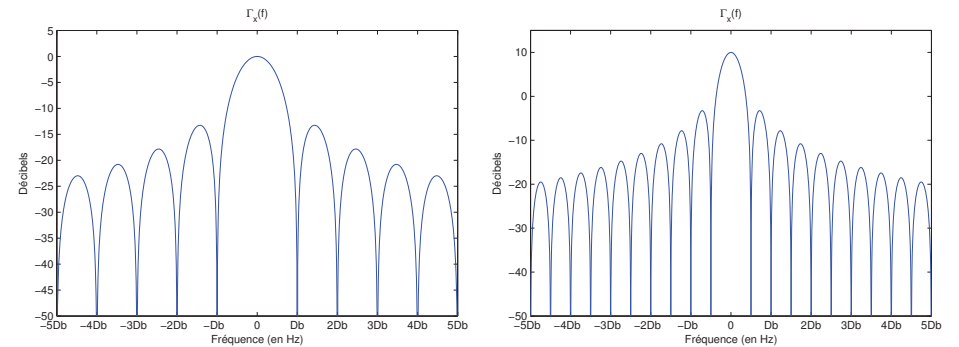
Filtre NRZ
 $B \approx D_b \approx \frac{1}{T}$

Filtre RZ
 $B \approx 2D_b \approx \frac{2}{T}$

Filtre Manchester
 $B \approx 2D_b \approx \frac{2}{T}$

$D_b = 1$ bit/seconde, $M = 2$, dictionnaire antipolaire

Quelques DSP des codes en ligne



Filtre NRZ
 $M = 2$
 $B \approx D_b \approx \frac{1}{T}$

Filtre NRZ
 $M = 4$
 $B \approx \frac{D_b}{2} \approx \frac{1}{T}$

$D_b = 1$ bit/seconde, dictionnaire antipolaire

A débit binaire, dictionnaire et filtre constant, lorsque M augmente, la largeur de bande diminue

Quelques DSP des codes en ligne : conclusion

- ▶ Dictionnaire antipolaire :

$$B_{NRZ} \approx \frac{1}{T}$$

$$B_{RZ} \approx \frac{2}{T}$$

$$B_{Manchester} \approx \frac{2}{T}$$

- ▶ Dictionnaire unipolaire : idem + apparition de raies fréquentielles pour $f = \frac{k}{T}$

Sommaire

Introduction

Emission d'un signal en bande de base

Transmission sur un canal à bande passante infinie en absence de bruit

- Hypothèses
- Interférences entre symboles
- Réception en absence de bruit

Transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie

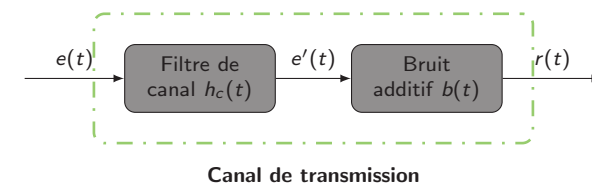
Transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée

Bilan

Notions importantes

- ▶ E_{sym} : énergie moyenne par symbole
- ▶ E_{bit} : énergie moyenne par bit
- ▶ P_x : puissance moyenne totale
- ▶ $\Gamma_x(f)$: densité spectrale de puissance
- ▶ B : largeur de bande

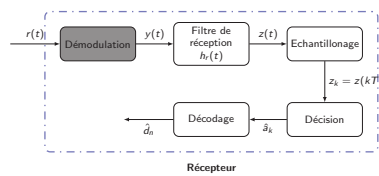
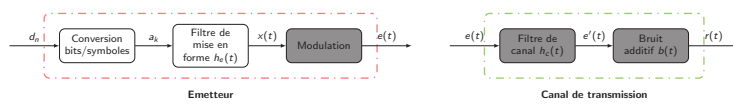
Transmission en absence de bruit



Rappel :

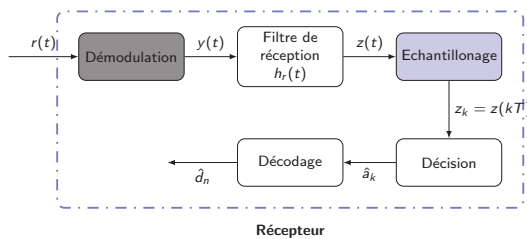
- ▶ On travaille en bande de base
- ▶ On suppose le canal idéal, invariant et de gain unitaire $H_c(f) = 1$ (bande passante du canal infinie)
- ▶ Ici, on suppose une absence de bruit $b(t) = 0$
 $r(t) = e(t)$

Transmission en absence de bruit



$$y(t) = x(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k h_e(t - kT)$$

Récepteur : échantillonnage

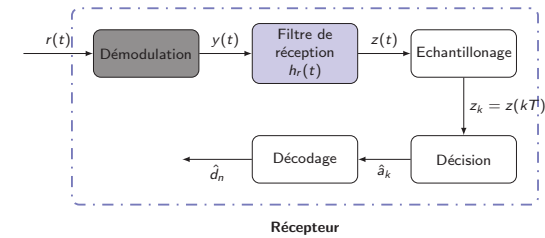


Si synchronisation parfaite :

$$z_k = z(kT) = \sum_{k' \in \mathbb{Z}} a_{k'} h(kT - k'T)$$

$$z_k = a_k h(0) + \sum_{k' \neq k} a_{k'} h((k - k')T)$$

Récepteur : filtre de réception



$$z(t) = (y * h_r)(t)$$

$$z(t) = \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k h_e(t - kT) \right) * h_r(t)$$

$$z(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k h(t - kT) \text{ avec } h = h_e * h_r$$

Interférence entre symboles (IES)

$$z_k = a_k h(0) + \underbrace{\sum_{k' \neq k} a_{k'} h((k - k')T)}_{\text{IES}}$$

- Problème : pour retrouver \$a_k\$ à partir de \$z_k\$, il y a un terme parasite qui dépend des symboles émis avant et après : interférence entre symboles
- Si l'on veut que ce terme soit nul, il faut que

$$h(kT) = 0 \text{ pour } k \neq 0$$

ce qui s'écrit aussi

$$h(kT) = h(0)\delta(k) : \text{condition de Nyquist}$$

Filtres de Nyquist

Filtres de Nyquist : filtre de réponse impulsionnelle $h(t)$ telle que

$$h(kT) = 0 \text{ pour } k \neq 0 \iff h(kT) = h(0)\delta(k) \text{ et } h(0) \neq 0$$

Exemples :

- ▶ Filtres à support temporel borné centré et strictement inférieur à $2T$
- ▶ Filtres à support temporel non borné mais s'annulant à tous les multiples de T
 - ▶ Exemple important : filtre en cosinus surelevé ($0 \leq \beta \leq 1$)

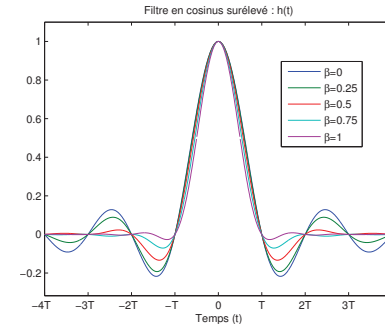
$$h(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \frac{\cos(\pi \beta t/T)}{1 - (2\beta t/T)^2}$$

Filtre en cosinus surélevé

Fonction de transfert :

$$H(f) = \begin{cases} T & \text{si } |f| < \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{T}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi t}{\beta} \left(|f| - \frac{1-\beta}{2T}\right)\right) \right] & \text{si } \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Filtre en cosinus surélevé



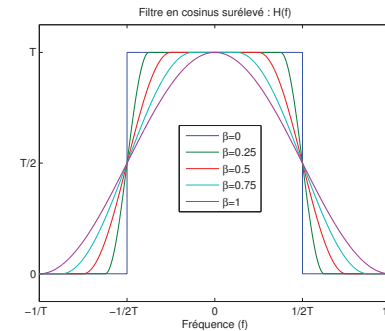
$$0 \leq \beta \leq 1$$

▶ Réponse impulsionnelle :

$$h(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \frac{\cos(\pi \beta t/T)}{1 - (2\beta t/T)^2}$$

▶ Support temporel infini

Filtre en cosinus surélevé

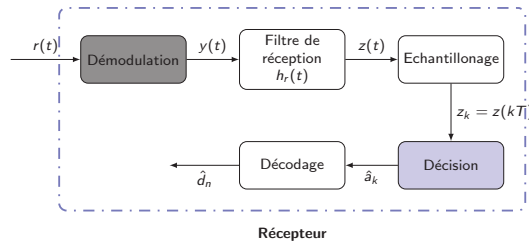


▶ Bande passante :

$$BP = \frac{1 + \beta}{2T}$$

comprise entre $\frac{1}{2T}$ et $\frac{1}{T}$

Décision en absence de bruit



Si l'on suppose que $h = h_e * h_r$ est un filtre de Nyquist, alors l'IES est nulle et on a donc

$$z_k = a_k h(0)$$

En connaissant $h(0)$ on peut donc estimer $\hat{a}_k = \frac{z_k}{h(0)}$. La probabilité d'erreur symbole est ici nulle car $\hat{a}_k = a_k$

Sommaire

Introduction

Emission d'un signal en bande de base

Transmission sur un canal à bande passante infinie en absence de bruit

Transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie

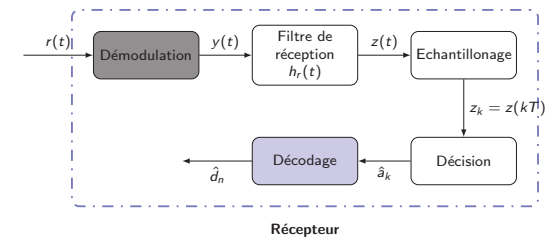
Hypothèses

Récepteur optimal

Réception en présence de bruit

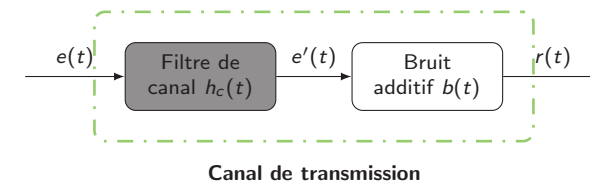
Transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée

Décodage en absence de bruit



En connaissant le dictionnaire utilisé, on peut retrouver \hat{d}_n à partir de $\hat{a}_k = a_k$ de façon parfaite. La probabilité d'erreur binaire est nulle car $\hat{d}_n = d_n$.

Transmission en présence de bruit blanc additif gaussien

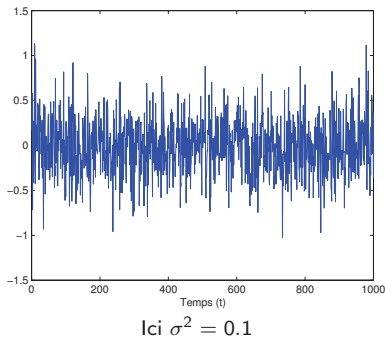


Rappel :

- ▶ On travaille en bande de base ($e(t) = x(t)$, $r(t) = y(t)$)
- ▶ On suppose le canal idéal, invariant et de gain unitaire $H_c(f) = 1$ (bande passante du canal infinie)
- ▶ Ici, on suppose que $b(t)$ est un bruit blanc gaussien de densité spectrale de puissance $\Gamma_b(f) = \frac{N_0}{2}$
- ▶ On parle de canal BBAG (Bruit Blanc Additif Gaussien)

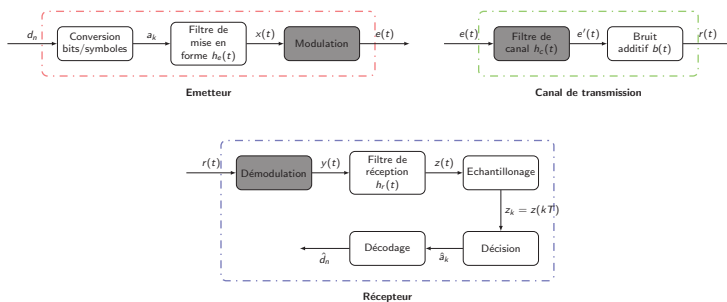
$$y(t) = x(t) + b(t)$$

Bruit blanc gaussien



- ▶ Signal aléatoire : on ne peut pas savoir quelles valeurs le signal va prendre, donc on utilise des probabilités
- ▶ Caractérisation par la moyenne (nulle pour un bruit blanc) et la variance $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$
- ▶ A priori, le signal peut prendre n'importe quelle valeur, on sait juste que plus cette valeur est éloignée de la moyenne, moins elle est probable
- ▶ Plus la variance est élevée, plus le signal a le droit de prendre des valeurs éloignées de la moyenne

Transmission en présence de bruit blanc additif gaussien



$$y(t) = x(t) + b(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k h_e(t - kT) + b(t)$$

Bruit gaussien

Fonction de Marcum $Q(x)$

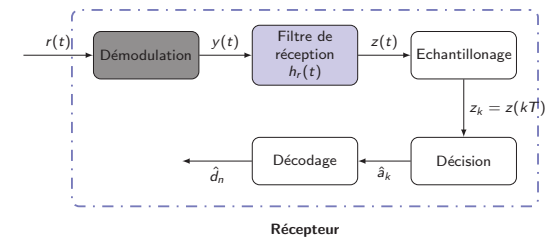
$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Si $b(t)$ est un bruit gaussien de moyenne nulle et de variance σ^2

$$p(b(t) > b_0) = Q\left(\frac{b_0}{\sigma}\right) \quad p(b(t) < b_1) = Q\left(-\frac{b_1}{\sigma}\right) = 1 - Q\left(\frac{b_1}{\sigma}\right)$$

$$p(b_0 < b(t) < b_1) = Q\left(\frac{b_0}{\sigma}\right) - Q\left(\frac{b_1}{\sigma}\right)$$

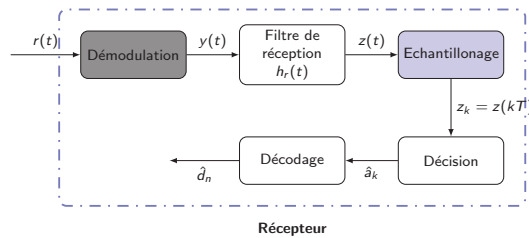
Récepteur : filtre de réception



$$z(t) = (y * h_r)(t)$$

$$z(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k h(t - kT) + n(t) \text{ avec } h = h_e * h_r \text{ et } n = b * h_r$$

Récepteur : échantillonnage

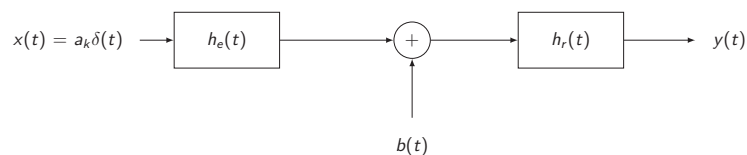


Si synchronisation parfaite :

$$z_k = z(kT) = \sum_{k' \in \mathbb{Z}} a_{k'} h(kT - k'T) + n(kT)$$

$$z_k = a_k h(0) + \sum_{k' \neq k} a_{k'} h((k - k')T) + n(kT)$$

Filtrage adapté



- Pour maximiser le rapport signal sur bruit en sortie du récepteur il faut

$$H_r(f) = H_e^*(f) \text{ ce qui implique } h_r(t) = h_e^*(-t)$$

- Dans ce cas, le rapport signal sur bruit vaut

$$SNR = \frac{2E_{h_e}}{N_0}$$

Récepteur optimal

$$z_k = a_k h(0) + \underbrace{\sum_{k' \neq k} a_{k'} h((k - k')T)}_{\text{IES}} + \underbrace{n(kT)}_{\text{bruit}}$$

- Si on veut faire le moins d'erreur possible, il faut que l'IES soit nulle et que l'influence du bruit soit la plus faible possible.

- On a déjà vu que pour que l'IES soit nulle : $h = h_e * h_r$ doit être un filtre de Nyquist

$$h(kT) = (h_e * h_r)(kT) = h(0)\delta(k)$$

- Comment choisir le filtre de réception $h_r(t)$ pour que l'influence du bruit soit la plus faible possible ?

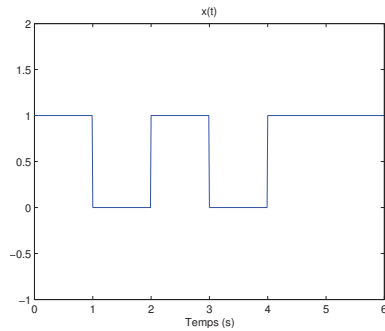
- Démonstration dans le TD 3 : maximisation du rapport signal sur bruit $SNR = \frac{h(0)^2}{P_n}$ par l'utilisation de l'inégalité de Cauchy-Schwartz
- Solution : h_r doit être le filtre adapté à h_e

Récepteur optimal : domaine temporel

Dans le domaine temporel :

- Si le filtre de réception est adapté au filtre d'émission, on a $h_r(t) = h_e(-t)$ (on suppose ici que les filtres sont réels)
- On a donc $h(t) = h_e(t) * h_e(-t)$
- On veut que h soit un filtre de Nyquist
- Cas simple : si $h_e(t)$ a un support strictement inférieur à T , alors en prenant $h_r(t) = h_e(-t)$, h est un filtre de Nyquist (ex : filtre NRZ, RZ, biphase Manchester...)

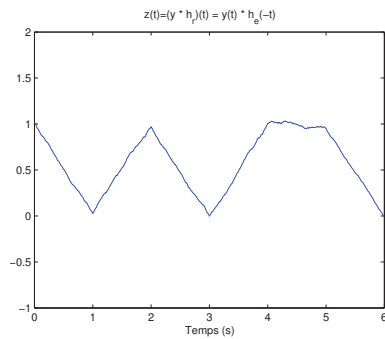
Exemple : filtre NRZ



Message binaire 101011 codé avec un dictionnaire binaire unipolaire et mis en forme par un filtre NRZ avec une période symbole $T=1s$

$$x(t)$$

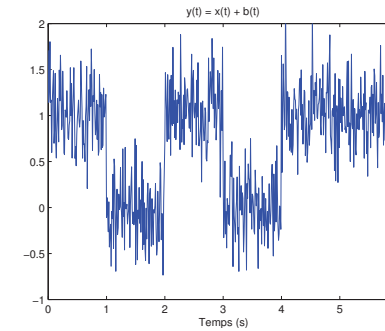
Exemple : filtre NRZ



Au niveau du récepteur, le signal bruité est passé dans un filtre de réception adapté au filtre de mise en forme :

$$z(t) = (y * h_r)(t) = y(t) * h_e(-t)$$

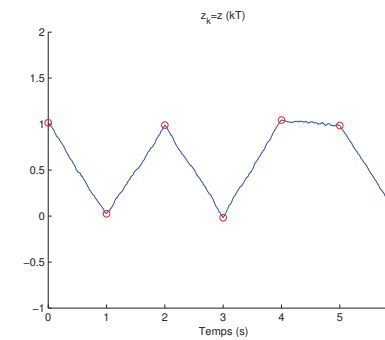
Exemple : filtre NRZ



Lors du passage dans le canal, ce signal a été perturbé par un bruit additif gaussien $b(t)$ de variance $\sigma^2=0.1$

$$y(t) = x(t) + b(t)$$

Exemple : filtre NRZ



Lorsqu'on échantillonne ce signal aux multiples de la période symbole T on retrouve les symboles envoyés (mais pas exactement à cause du bruit)

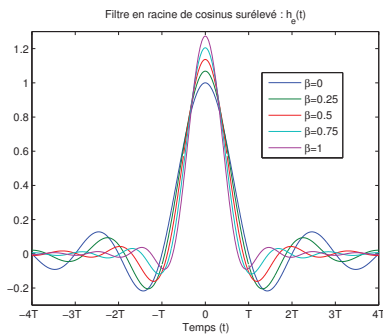
Récepteur optimal : domaine fréquentiel

Dans le domaine fréquentiel :

- ▶ Si le filtre de réception est adapté au filtre d'émission, on a $H_r(f) = H_e^*(f)$
- ▶ On a donc $H(f) = H_e(f)H_r(f) = |H_e(f)|^2$, qui est réel et positif
- ▶ Cas simple : partir d'un filtre de Nyquist de réponse fréquentielle $H(f)$ réelle et positive et prendre

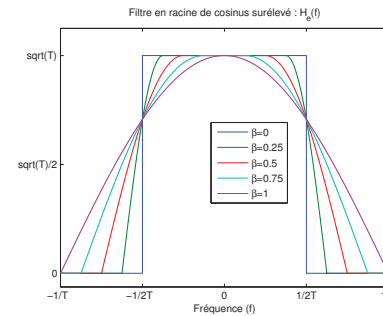
$$H_e(f) = H_r(f) = \sqrt{H(f)}$$

Filtre en racine de cosinus surelevé



- ▶ Dans le domaine temporel : ce n'est plus un filtre de Nyquist (pas d'annulation aux multiples de T)
- ▶ En revanche, $h(t) = h_e(t) * h_e(-t)$ est un filtre de Nyquist

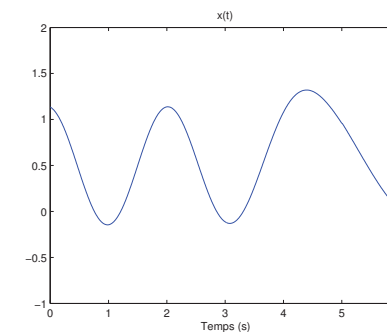
Filtre en racine de cosinus surelevé



- ▶ Dans le domaine fréquentiel : racine de la fonction de transfert d'un filtre en cosinus surelevé

▶ **Bande passante** $BP = \frac{1 + \beta}{2T}$

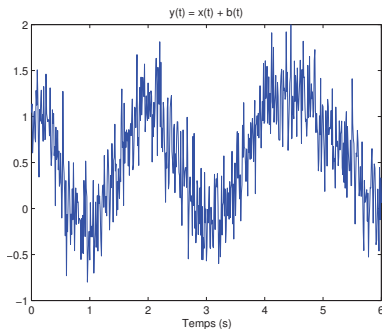
Exemple : filtre RCS



Message binaire 101011 codé avec un dictionnaire binaire unipolaire et mis en forme par un filtre TRC avec une période symbole $T=1s$

$$x(t)$$

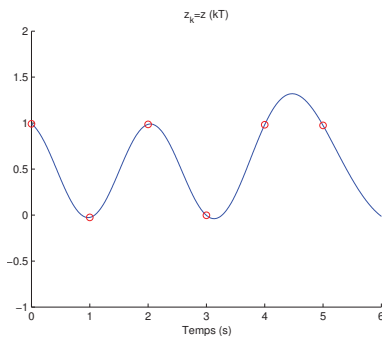
Exemple : filtre RCS



Lors du passage dans le canal, ce signal a été perturbé par un bruit additif gaussien $b(t)$ de variance $\sigma^2=0.1$

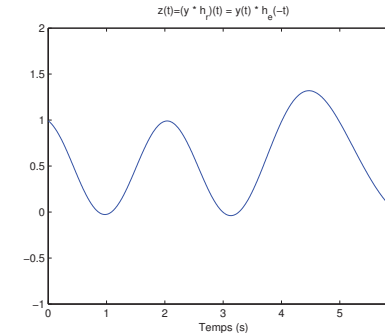
$$y(t) = x(t) + b(t)$$

Exemple : filtre RCS



Lorsqu'on échantillonne ce signal aux multiples de la période symbole T on retrouve les symboles envoyés (mais pas exactement à cause du bruit)

Exemple : filtre RCS



Au niveau du récepteur, le signal bruité est passé dans un filtre de réception adapté au filtre de mise en forme :

$$z(t) = (y * h_r)(t) = y(t) * h_e(-t)$$

Récepteur optimal : bilan

Conditions :

- ▶ $h_r(t)$ doit être le filtre adapté $h_e(t)$ pour maximiser le SNR en sortie du récepteur

$$h_r(t) = h_e(-t) \quad H_r(f) = H_e^*(f)$$

- ▶ $h = h_e * h_r$ doit être un filtre de Nyquist

$$h(kT) = h(0)\delta(k)$$

Deux cas simples de filtres formant un récepteur optimal

- ▶ $h_e(t)$ de support temporel inférieur à T , et $h_r(t) = h_e(-t)$
- ▶ OU $H_e(f) = H_r(f) = \sqrt{H(f)}$ où $H(f)$ est un filtre de Nyquist

Bilan

Notions importantes

- ▶ Filtre de Nyquist
- ▶ Interférence entre symboles
- ▶ Filtre adapté
- ▶ Récepteur optimal

Récepteur optimal : conséquences

Rappel :

$$z_k = a_k h(0) + \underbrace{\sum_{l \neq k} a_l h((k-l)T)}_{\text{IES}} + \underbrace{n(kT)}_{\text{bruit}}$$

Si le récepteur est optimal (ce qui sera le cas dans la suite du cours) :

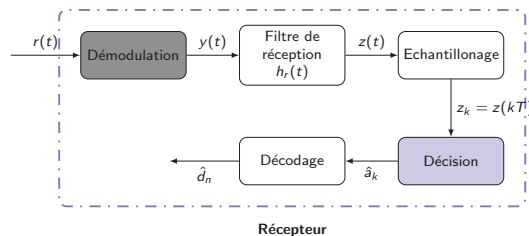
- ▶ IES = 0
- ▶ $h(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} H_e(f) H_e^*(f) df = E_{h_e}$

Donc :

$$z_k = E_{h_e} a_k + n(kT)$$

→ Il va falloir estimer \hat{a}_k à partir de z_k , malgré le bruit

Décision



Etape supplémentaire à cause de la présence de bruit : il faut affecter une valeur de symbole à chaque z_k

Exemple : $z_k = 1.26 E_{h_e} \rightarrow \hat{a}_k = 1$, $z_k = -0.34 E_{h_e} \rightarrow \hat{a}_k = 0$, etc...

Décision par seuil : cas binaire

- ▶ Idée : utiliser un seuillage pour décider de la valeur de chaque symbole
- ▶ Exemple : codage binaire antipolaire $a_k = 1$ ou $a_k = -1$ (qu'on suppose équiprobable)
 - ▶ On a donc $z_k = E_{h_e} + n(kT)$ ou $z_k = -E_{h_e} + n(kT)$
 - ▶ $n(kT)$ est aléatoire et gaussien, de moyenne nulle
 - ▶ Une idée intuitive est de seuiller :
 - ▶ si $z_k > 0$ alors $\hat{a}_k = 1$
 - ▶ sinon $\hat{a}_k = -1$

Décision par seuil : cas M-aire

Dans le cas de M symboles, on utilise le même principe

- ▶ On calcule $\frac{z_k}{E_{h_e}}$ et on regarde quel symbole du dictionnaire est le plus proche (au sens de la distance euclidienne)
- ▶ On décide ensuite que \hat{a}_k est ce symbole

Exemple : $M = 4$ et $\frac{z_k}{E_{h_e}} = 1.56 \quad 3.82 \quad 2.10 \quad -2.10$
 $\longrightarrow 1 \quad 3 \quad 3 \quad -3$

Calcul de la probabilité d'erreur (cas binaire)

Supposons que l'on utilise un dictionnaire binaire antipolaire ($a_k = 1$ ou $a_k = -1$).
 Quelle est la probabilité de faire une erreur sur le symbole ?

- ▶ On a soit $z_k = E_{h_e} + n(kT)$, soit $z_k = -E_{h_e} + n(kT)$
- ▶ On a déjà vu que $P_n = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_r(f)|^2 df = \frac{N_0 E_{h_e}}{2}$ (car le récepteur est supposé optimal)
- ▶ $n(t)$ est un bruit gaussien de moyenne nulle et de variance $\sigma_n^2 = P_n$
- ▶ Intuitivement on va dire que si $z_k > 0$, alors $\hat{a}_k = 1$, et sinon $\hat{a}_k = -1$

Probabilité d'erreur

Si le bruit est trop important, on risque de faire des erreurs

Probabilité d'erreur par symbole

La probabilité d'erreur symbole P_{sym}^{err} correspond à la probabilité de faire une erreur sur un symbole

$$P_{sym}^{err} = p(\hat{a}_k \neq a_k)$$

Cette erreur sur les symboles se répercute ensuite sur les bits après décodage.

Probabilité d'erreur par bit

La probabilité d'erreur par bit P_{bit}^{err} correspond à la probabilité de faire une erreur sur un bit

$$P_{bit}^{err} = p(\hat{d}_n \neq d_n)$$

Calcul de la probabilité d'erreur (cas binaire)

Quand va-t-on faire une erreur ? 2 cas :

- ▶ Quand $a_k = -1$ et que $z_k > 0$
- ▶ Quand $a_k = 1$ et que $z_k < 0$

Calcul de la probabilité d'erreur (cas binaire)

- ▶ Si $a_k = -1$ alors $z_k = -E_{h_e} + n(kT)$. Si on a $z_k > 0$, c'est donc que $n(kT) > E_{h_e}$. Or $n(t)$ est gaussien de moyenne nulle et de variance P_n donc

$$p(n(kT) > E_{h_e}) = Q\left(\frac{E_{h_e}}{\sqrt{P_n}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_{h_e}}{N_0}}\right)$$

- ▶ Si $a_k = 1$ alors $z_k = E_{h_e} + n(kT)$. Si on a $z_k < 0$, c'est donc que $n(kT) < -E_{h_e}$. Or $n(t)$ est gaussien de moyenne nulle et de variance P_n donc

$$p(n(kT) < -E_{h_e}) = 1 - Q\left(\frac{-E_{h_e}}{\sqrt{P_n}}\right) = Q\left(\frac{E_{h_e}}{\sqrt{P_n}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_{h_e}}{N_0}}\right)$$

Finalement comme les a_k sont équiprobables,

$$P_{sym}^{err} = \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{2E_{h_e}}{N_0}}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{2E_{h_e}}{N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_{h_e}}{N_0}}\right)$$

Energie moyenne par bit

Rappel : Dans le cas d'un dictionnaire antipolaire à M symboles, on peut montrer que

$$E_{bit} = \frac{M^2 - 1}{3 \log_2 M} E_{h_e}$$

où E_{bit} est l'énergie moyenne par bit. On a aussi $E_{bit} = P_x D_b$ où P_x est la puissance émise moyenne et D_b le débit binaire.

Probabilité d'erreur M-aire (antipolaire)

Généralisation (admise) : on peut montrer qu'avec un dictionnaire antipolaire à M éléments, on a

$$P_{sym}^{err} = 2 \frac{M-1}{M} Q\left(\sqrt{\frac{2E_{h_e}}{N_0}}\right)$$

- ▶ Remarque : on retrouve bien notre expression quand $M = 2$!
- ▶ La probabilité d'erreur dépend du nombre de symboles du dictionnaire M , de la variance du bruit blanc additif gaussien $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$, et de l'énergie du filtre de mise en forme/filtre de réception E_{h_e} .

Probabilité d'erreur M-aire (antipolaire)

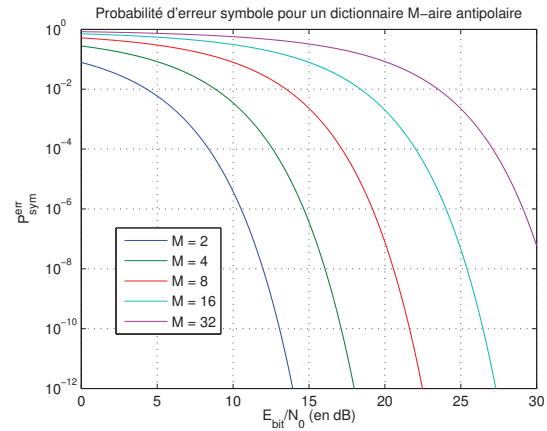
Avec cette définition, on peut réécrire pour un dictionnaire M -aire antipolaire

$$P_{sym}^{err} = 2 \frac{M-1}{M} Q\left(\sqrt{\frac{2E_{bit}}{N_0} \frac{3 \log_2 M}{M^2 - 1}}\right)$$

- ▶ Pour minimiser P_{sym}^{err} , il faut augmenter E_{bit} donc soit augmenter la puissance émise moyenne P_x , soit diminuer le débit binaire D_b
- ▶ A $\frac{E_{bit}}{N_0}$ fixé, plus on augmente M , plus la probabilité d'erreur augmente
- ▶ Remarque : si on utilise un codage de Grey on a

$$P_{bit}^{err} \approx \frac{P_{sym}^{err}}{\log_2 M}$$

Probabilité d'erreur M-aire (antipolaire)



Sommaire

Introduction

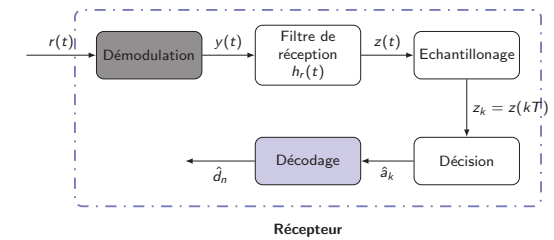
Emission d'un signal en bande de base

Transmission sur un canal à bande passante infinie en absence de bruit

Transmission sur un canal BBAG à bande passante infinie

Transmission sur un canal BBAG à bande passante limitée

Décodage



En connaissant le dictionnaire utilisé, on peut retrouver \hat{d}_n à partir de $\hat{a}_k = a_k$. La probabilité d'erreur binaire dépend de la probabilité d'erreur par symbole et du dictionnaire utilisé.

Largeur du bande du signal

- ▶ Nous avons vu en TP que les signaux en bande de base ont une largeur de bande que l'on peut écrire :
 - ▶ filtre NRZ : $B \approx \frac{1}{T}$
 - ▶ filtre RZ : $B \approx \frac{2}{T}$
 - ▶ filtre biphase Manchester : $B \approx \frac{2}{T}$
 - ▶ filtre en racine de cosinus surelevé : $B = \frac{1+\beta}{2T}$
- ▶ B dépend du type de filtre de mise en forme $h_e(t)$, du débit binaire D_b , et de la taille M de l'alphabet utilisé

Bande passante du canal

- ▶ Pour le moment, on a considéré que le canal était idéal et avait une bande passante infinie ($H_c(f) = 1$)
- ▶ En réalité, la bande passante du canal BP est limitée et le canal est plutôt de la forme

$$H_c(f) = \begin{cases} 1 & \text{si } -BP < f < BP \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- ▶ Ceci est du
 - ▶ soit à la nature physique du canal (ex : type de câble, atténuation du signal sur de grandes distances, etc...)
 - ▶ soit à des réglementations (ex : bande de fréquence achetée par un opérateur téléphonique, etc...)

Paramètres d'une chaîne de transmission

- ▶ D_b : débit binaire (en bits/seconde)
- ▶ B : largeur de bande du signal en bande de base (en Hz) (égale à la bande passante BP du canal).
- ▶ $P_x = E_{bit} D_b$: puissance émise moyenne (en W)
- ▶ P_{bit}^{err} : probabilité d'erreur par bit

On veut D_b le plus grand possible, P_x et P_{bit}^{err} les plus petits possibles, et $B = BP$ est souvent fixe.

Transmission en bande de base

- ▶ Afin de transmettre le plus d'information possible on fait en sorte d'utiliser toutes les capacités du canal, mais sans les dépasser !
- ▶ Si l'on connaît la bande passante du canal (ce qui est en pratique toujours le cas), on va faire en sorte que la largeur du bande du signal en bande de base soit du même ordre

$$B \approx BP$$

- ▶ En effet, si $B > BP$ de l'information sera perdue lors de la transmission, et si $B < BP$ alors on a tendance à être plus sensible au bruit
- ▶ Connaissant la bande passante du canal de transmission, la largeur de bande va donc être fixée. Ceci va contraindre les choix de dictionnaire, filtres de mise en forme, etc...

Evaluation d'une chaîne de transmission

Efficacité spectrale

$$\eta = \frac{D_b}{B} = \frac{\log_2 M}{T B}$$

η le plus grand possible : D_b maximal et B minimal

Taux d'erreur binaire

$$TEB = \frac{\text{nombre de bits mal détectés}}{\text{nombre total de bits émis}}$$

NB : P_{bit}^{err} est le TEB quand le nombre total de bits est infini

Dimensionnement d'une chaîne de transmission

- ▶ Principe : on a des contraintes sur D_b , $B (=BP)$, P_x et/ou P_{bit}^{err}
- ▶ Selon l'application et le type de transmission, on va réaliser des compromis entre ces paramètres
- ▶ On va choisir en fonction de ces contraintes le dictionnaire (valence + type de dictionnaire) et les filtres d'émission/réception