

Transmission des signaux numériques

Dr. Redouane AYAD

Efrei

2024-2025

TRANSMISSION DES SIGNAUX NUMÉRIQUES

- Les **STM** véhiculent de l'information entre une **source** et un **destinataire** en utilisant un **support physique comme** le câble, la fibre optique ou, encore, la propagation sur un canal radioélectrique.
- Les signaux transportés peuvent être soit **directement d'origine numérique** comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais **convertis** sous une forme numérique.
- La tâche du **STM** est d'**acheminer** le signal de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

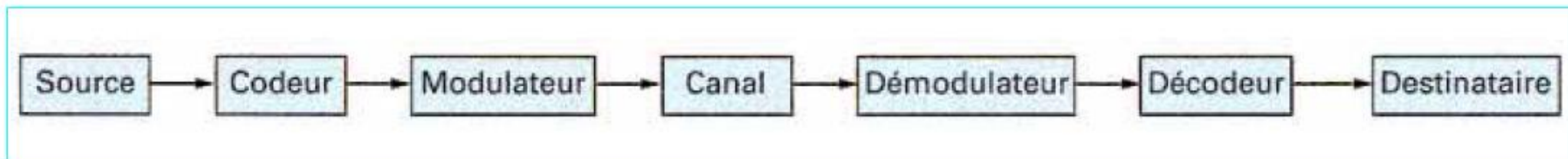


Figure A – Schéma simplifié d'un système de transmission numérique

TRANSMISSION DES SIGNAUX NUMÉRIQUES

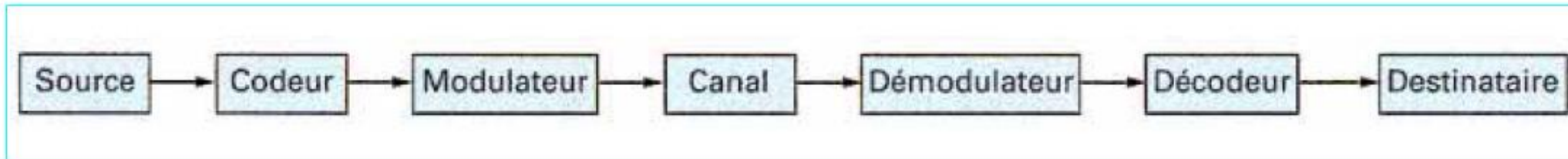


Figure A – Schéma simplifié d'un système de transmission numérique

- La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires.
- Le codeur englobe en général deux fonctions fondamentalement différentes.
- La première, appelée **codage en ligne**, associe un support physique adéquat aux éléments abstraits émis par la source.
- La seconde, appelée **codage correcteur d'erreurs**, consiste à introduire de la redondance dans le signal émis en vue de le protéger contre le bruit et les perturbateurs présents sur le canal de transmission.
- La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.
- Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

TRANSMISSION DES SIGNAUX NUMÉRIQUES

- La qualité d'un système de transmission est évaluée, en général, **en calculant la probabilité d'erreur par bit** (élément binaire) transmis. Celle-ci est fonction de la technique de transmission utilisée, mais aussi du canal sur lequel le signal est transmis.
- Une autre caractéristique essentielle est **l'occupation spectrale** du signal émis. Pour utiliser efficacement le spectre disponible sur le canal de transmission, on est contraint d'utiliser de plus en plus des **modulations à grande efficacité spectrale**.
- Le troisième aspect important d'un système de transmission est **la complexité du récepteur** dont la fonction est de restituer le signal émis.

TRANSMISSION DES SIGNAUX NUMÉRIQUES

- Ainsi, les performances (probabilité d'erreur par bit), l'occupation spectrale et la complexité du récepteur constituent les trois caractéristiques principales permettant de comparer entre elles les différentes techniques de transmission.

Sigle	Signification
BSC	<i>Binary Symmetric channel</i> (canal symétrique binaire)
CPM	<i>Continuous-phase modulation</i> (modulation à enveloppe constante et à phase continue)
EQM	Erreur quadratique moyenne
IES	Interférence entre symboles
MAQ	Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature
MCB	Modulation codée en blocs
MCT	Modulation codée en treillis
MDA	Modulation à déplacement d'amplitude
MDF	Modulation à déplacement de fréquence
MDP	Modulation à déplacement de phase
MLE	<i>Maximum level error</i> (niveau maximal d'erreur)

MSK	<i>Minimum shift keying</i> (MDF à indice minimal)
NRZ	<i>Nonreturn to zero</i> (non-retour à zéro)
OQPSK	<i>Offset quaternary phase-shift keying</i> (MDP-4 à trains décalés)
PLL	<i>Phase-lock loop</i> (boucle à verrouillage de phase)
S/B	Rapport signal à bruit
VCO	<i>Voltage-controlled oscillator</i> (oscillateur commandé par tension)

1. Transmission en bande de base

1.1 Généralités

- Le terme « **bande de base** » signifie que le signal est transmis sur le canal **sans l'opération de modulation** qui translate (éventuellement en le modifiant) le spectre du signal pour le centrer sur une fréquence porteuse f_0 . Autrement dit, la fréquence porteuse d'une transmission en bande de base est la fréquence zéro ($f_0 = 0$). Le schéma synoptique d'un système de transmission en bande de base est illustré à la figure 1.

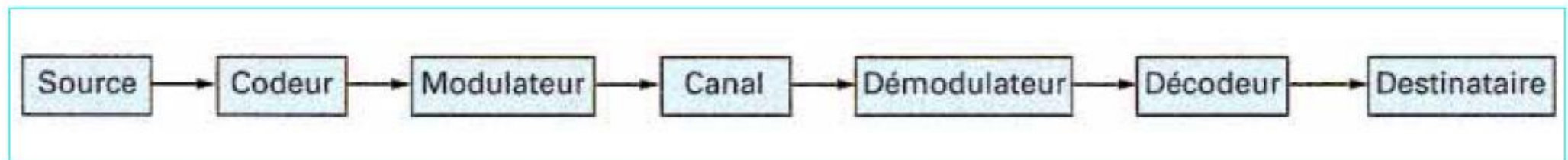


Figure A – Schéma simplifié d'un système de transmission numérique

1. Transmission en bande de base

1.1 Généralités

Le signal à transmettre est une suite d'éléments binaires $\{\beta_n\}$. Cette suite abstraite prenant ses valeurs de l'alphabet $\{0,1\}$ est codée en une suite $\{a_n\}$ qui module l'amplitude des impulsions $q(t)$ à la cadence d'émission des symboles que nous notons $1/T_s$. Lorsque les symboles a_n sont binaires, leur cadence d'émission $1/T_s$ est égale à la cadence d'émission des bits $1/T_b$ (T_b est la durée d'un bit). Par contre, si les symboles a_n sont quaternaires, leur cadence d'émission est la moitié de la cadence d'émission des bits β_n . D'une façon générale, la cadence d'émission des symboles a_n est donnée par $1/T_s = (1/T_b) (1/\log_2 M)$ si les symboles prennent leurs valeurs d'un alphabet M -aire.

1. Transmission en bande de base

1.1 Généralités

1. Suite d'éléments binaires $\{\beta_n\}$

- Le signal à transmettre est une suite d'éléments binaires ($\{\beta_n\}$) qui représentent des données sous forme de bits, avec des valeurs possibles de 0 ou 1.

2. Codage en symboles $\{a_n\}$

- Les bits β_n sont **convertis** en une nouvelle suite de valeurs $\{a_n\}$, appelées symboles. Cela dépend du type de modulation utilisée. Chaque symbole représente une ou plusieurs valeurs binaires.

3. Modulation d'amplitude des impulsions

- La séquence de symboles $\{a_n\}$ est ensuite utilisée pour **moduler** (c'est-à-dire modifier) l'amplitude d'une impulsion appelée $q(t)$. Cela signifie que les symboles déterminent comment l'amplitude des impulsions évolue au cou↓u temps.

1. Transmission en bande de base

1.1 Généralités


4. Cadence d'émission des symboles $1/T_s$

- **Cadence d'émission** : fréquence à laquelle les symboles sont envoyés. Notée $1/T_s$, elle dépend du nombre de symboles par seconde.
 - Si les symboles $\{a_n\}$ sont binaires, cela signifie que chaque symbole représente un bit (soit 0, soit 1). Dans ce cas, la **cadence d'émission des symboles** $1/T_s$ est égale à la **cadence d'émission des bits** $1/T_b$.
 - Si les symboles sont quaternaires (par exemple, ils peuvent prendre 4 valeurs possibles), un symbole représente **deux bits**. Donc la **cadence d'émission des symboles** sera plus lente que celle des bits : elle est divisée par 2.

5. Formule générale de la cadence d'émission :

- La cadence d'émission des symboles $1/T_s$ peut être calculée en fonction de la cadence des bits $1/T_b$ et du nombre de symboles M dans l'alphabet utilisé pour coder les données :

$$1/T_s = \frac{1/T_b}{\log_2(M)}$$

Cela signifie que plus l'alphabet est grand (plus on peut coder d'informations avec un seul symbole), plus la cadence d'émission des boles est lente.

1. Transmission en bande de base

1.1 Généralités

6. Signal émis :

- Le signal envoyé est une somme d'impulsions $q(t)$ modulées par les symboles $\{a_n\}$ à intervalles réguliers T , et il est représenté par :

$$s(t) = \sum a_n q(t - nT)$$

Ce signal $s(t)$ est ce que l'émetteur envoie sur le canal de transmission.

7. Caractéristiques spectrales et canal de transmission

- Le choix de l'impulsion $q(t)$ est important, car il influence à la fois le **spectre** du signal (comment l'énergie est répartie en fonction de la fréquence) et les **performances** du système.
- Le **canal de transmission** est modélisé comme un filtre linéaire (réponse impulsionnelle $h(t)$) qui peut introduire des distorsions dans le signal. Ce filtre est suivi de **bruit gaussien** qui vient perturber le signal.

1. Transmission en bande de base

1.1 Généralités

8. Réception du signal :

- Le signal reçu est d'abord filtré à travers un **filtre de réception** (réponse impulsionnelle $c(t)$) pour réduire le bruit et améliorer la qualité du signal.
- Ensuite, ce signal est **échantillonné** (mesuré à intervalles réguliers) à la cadence $1/T_s$, correspondant à la cadence d'émission des symboles.

9. Décision et décodeur :

- Après échantillonnage, un **circuit de décision** prend les échantillons du signal et décide quels étaient les symboles \hat{a}_n envoyés.
- Enfin, le **décodeur** reconstruit les bits $\hat{\beta}_n$ à partir des symboles estimés.

1.2 Codes en ligne

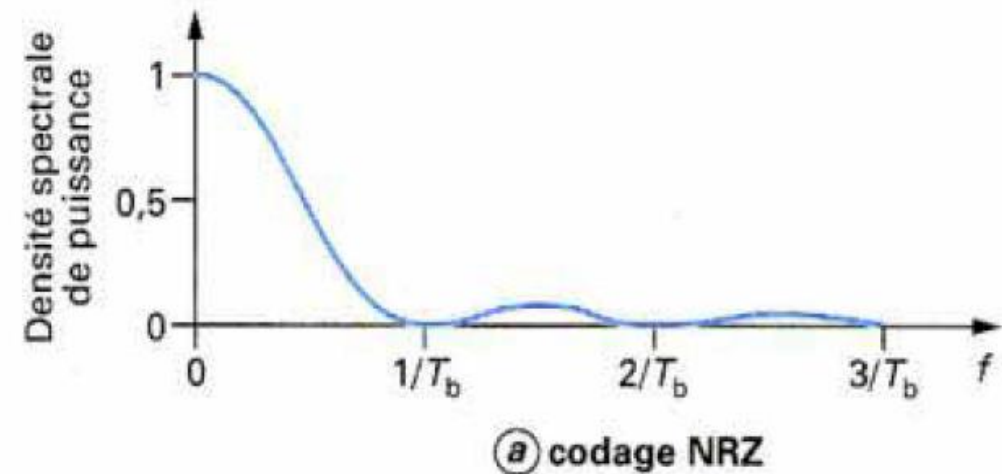
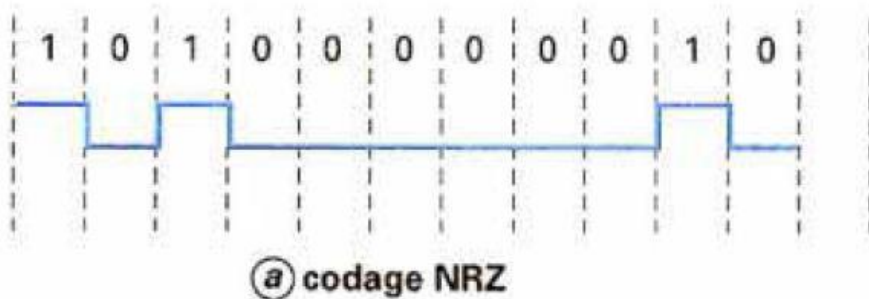
- Il existe un certain nombre de codes en ligne dont la fonction est d'associer une suite d'impulsions physiques à la suite d'éléments binaires à l'entrée du système de transmission. Les principales caractéristiques des codes en ligne sont les suivantes :
 - **l'occupation spectrale** : la largeur de la bande de fréquence occupée est fonction du code utilisé. Par ailleurs, le spectre de certains codes n'a pas de composante à la fréquence zéro et ses composantes basses fréquences sont fortement atténuées, ce qui est intéressant dans certaines applications ;
 - **La densité des transitions dans le signal émis** : cette propriété est primordiale pour restituer une horloge à la fréquence $1/T_s$ dans le récepteur en vue d'échantillonner le signal et de restituer l'information émise ;
 - **l'immunité au bruit** : le milieu de transmission est toujours bruité et le codage utilisé influe sur le taux d'erreur binaire qui constitue la principale mesure de qualité des liaisons numériques.

1.2.1 Codage « non-retour à zéro » (NRZ)

Le codage **non-retour à zéro** (NRZ) associe une impulsion positive au bit « 1 » et une impulsion négative au bit « 0 », comme illustré à la figure 2a. Les deux impulsions ont une forme rectangulaire identique, de durée T_b , et ne diffèrent que par leur signe.

Le spectre d'un signal NRZ aléatoire, dont les bits successifs ne sont pas corrélés, est décrit par l'expression suivante :

$$S(f) = T_b^2 \left[\frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b} \right]^2$$



NRZ

L'**occupation spectrale** de ce signal est théoriquement infinie, et la première annulation du spectre a lieu à la fréquence $1/T_b$ (en Hz), comme illustré à la figure 3a. Cependant, ce spectre est plus étroit que celui d'autres codes en ligne, qui augmentent la bande passante pour favoriser les transitions dans le signal, facilitant ainsi l'extraction de l'horloge au récepteur.

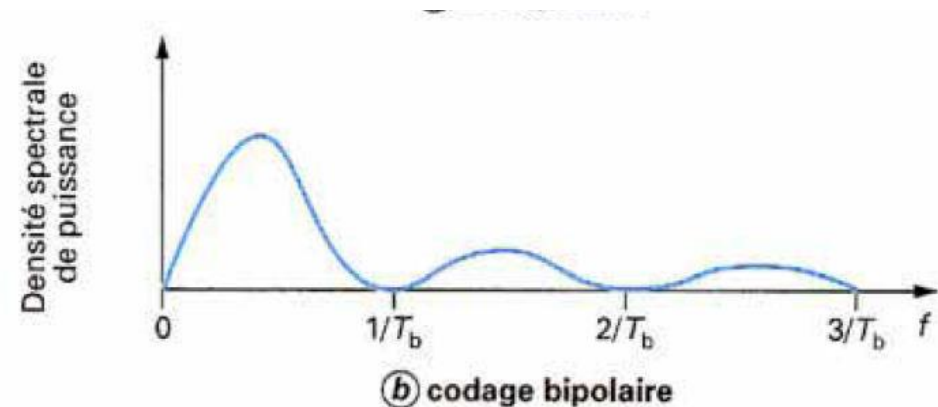
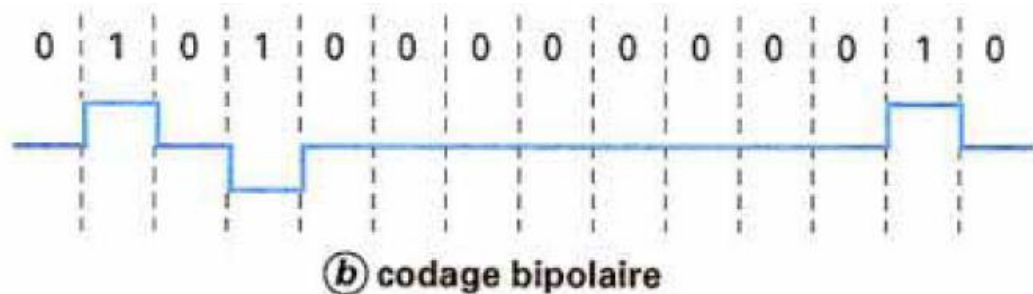
Dans le cas du codage NRZ, les transitions dans le signal émis sont directement liées à la séquence binaire d'entrée. Cependant, cela pose un problème : lors de la transmission d'une longue séquence de bits identiques, comme plusieurs « 0 » ou « 1 » consécutifs, le signal ne contient plus d'informations rythmiques (horloge), rendant difficile la synchronisation.

1.2.2 Codage bipolaire

Ce codage est illustré à la figure **2b**. On remarque que les « 1 » successifs sont codés en des impulsions rectangulaires de polarités alternées. Les « 0 » par contre sont codés en un niveau zéro, ce qui correspond à l'absence d'émission d'énergie. Le signal réellement émis a ainsi trois niveaux, mais un symbole émis ne transporte qu'un seul bit d'information ; nous avons $T_s = T_b$.

La densité spectrale de puissance d'un signal aléatoire avec codage bipolaire est donnée par l'expression :

$$S(f) = T_b \sin^2(\pi f T_b) \left[\frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b} \right]^2 \quad (3)$$

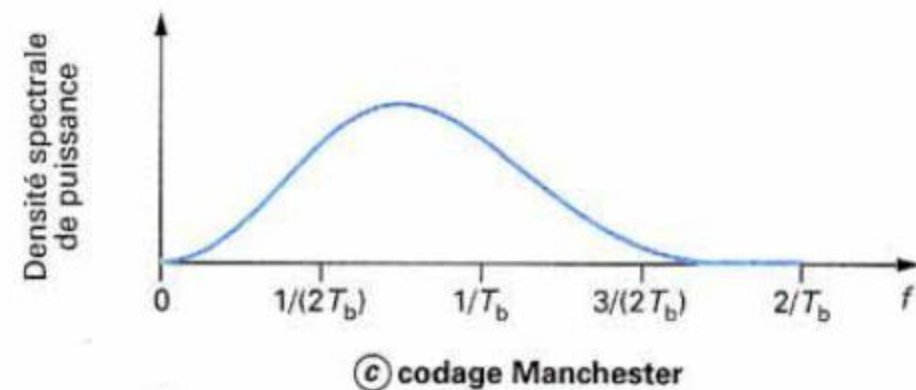
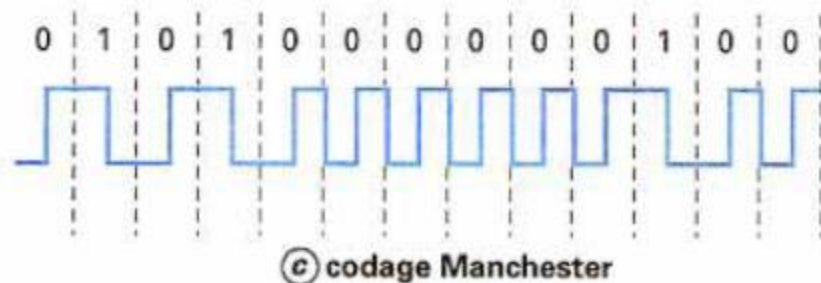


Codage Bipolaire

- Comme on le voit sur la figure 3b, le spectre du code bipolaire passe par zéro à la fréquence zéro, ce qui rend ce code attrayant pour les canaux ne pouvant passer les basses fréquences. En revanche, la décroissance de la densité spectrale $S(f)$ avec la fréquence est plus lente que dans le code NRZ, ce qui nécessite une bande plus large pour la transmission du signal. Dans sa forme d'origine, le code bipolaire ne résout pas le problème lié aux longues suites de « 0 », car une telle suite implique l'absence d'émission d'énergie et par conséquent de transitions. Une variante de ce code consiste à émettre une impulsion pour le huitième bit dans une suite de « 0 » consécutifs. Ainsi, l'absence de transitions dans le signal ne peut excéder une durée de 7 bits. Cette impulsion est de même polarité que la dernière impulsion correspondant à l'émission d'un « 1 ». Dans le récepteur, cette impulsion est aisément reconnue, car elle « viole » la loi d'alternance des polarités des impulsions correspondant à l'émission de « 1 ».

1.2.3 Code Manchester

- Comme le montre la figure 2c, ce code génère des transitions à chaque durée de bit, quelle que soit la séquence émise. Un « 1 » dans ce code est codé en une impulsion rectangulaire de durée T_b avec inversion de polarité au milieu du bit, la première moitié étant de signe positif. Un « 0 » est codé en une impulsion identique, mais de polarité opposée. Les transitions à chaque durée bit rendent l'extraction d'horloge très facile, mais une suite de « 0 » ou de « 1 » générant des impulsions de largeur $T_b/2$, l'occupation spectrale se trouve élargie.



1.2.3 Code Manchester

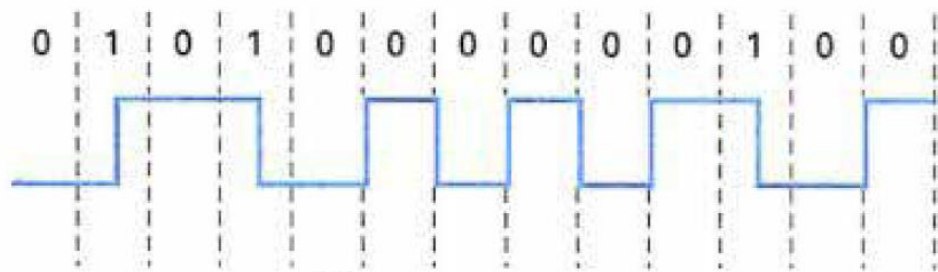
La densité spectrale de puissance du signal est donnée par l'expression :

$$S(f) = T_b \frac{\sin^4(\pi f T_b / 2)}{(\pi f T_b / 2)^2} \quad (4)$$

La forme du spectre est donnée à la figure **3c** où l'on remarque qu'une bonne partie de l'énergie est au-delà de la fréquence $1/T_b$. On remarque également qu'aussi bien la densité spectrale $S(f)$ que sa dérivée première s'annulent à la fréquence $f = 0$, ce qui rend ce code bien adapté à la transmission sur canaux ne passant pas les basses fréquences.

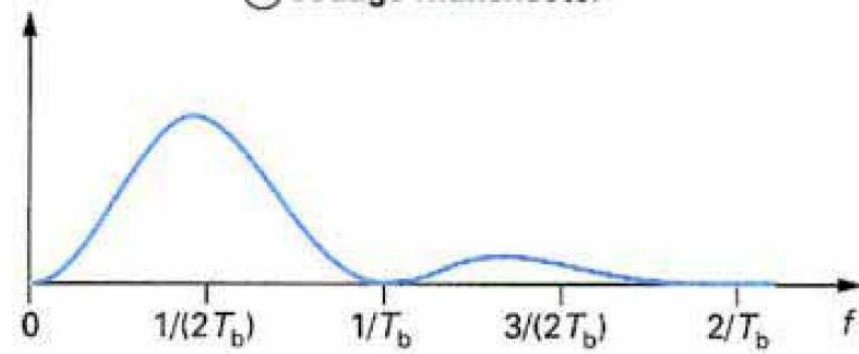
1.2.4 Code de Miller

- **Codage des bits :**
- « **1** » : impulsion Manchester avec inversion de polarité au milieu de la durée T_{bT_bTb} .
- « **0** » : impulsion sans changement de polarité.
 - Si le bit précédent est un « **1** » : pas de transition (continuité).
 - Si le bit précédent est un « **0** » : inversion de polarité.
 - **Caractéristiques principales :**
- **Transition toutes les deux durées de bit au maximum** : garantit une synchronisation fiable du signal.
- **Réduction de l'occupation spectrale** : moins de transitions qu'en Manchester classique, ce qui diminue la largeur de bande nécessaire.
- **Durée minimale des impulsions = T_{bT_bTb}** : aucune impulsion inférieure à T_{bT_bTb} , ce qui aide à concentrer la densité spectrale.

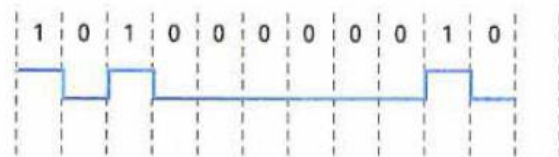


(d) codage de Miller

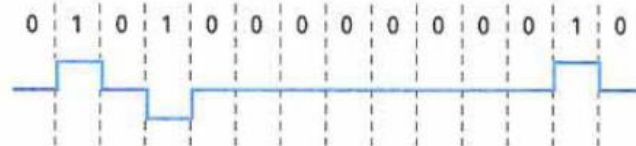
Densité spectrale
de puissance



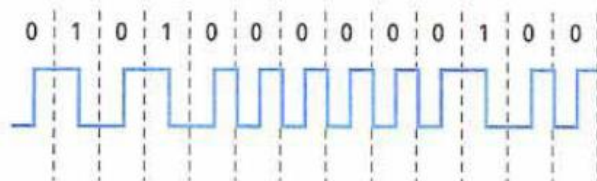
(d) codage de Miller



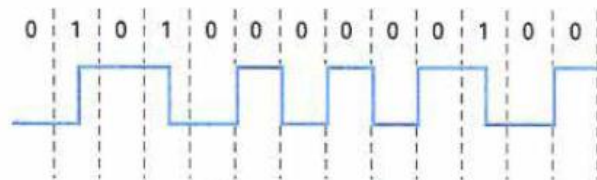
(a) codage NRZ



(b) codage bipolaire



(c) codage Manchester



(d) codage de Miller

1.2.4 Code de Miller

- **Densité Spectrale de Puissance (DSP)**
- **Expression de la DSP :**

$$S(f) = T_b [1 - \cos(2\pi f T_b)] [1 - \cos(\pi f T_b)] / (\pi f T_b)^2 \quad (5)$$

- **Moins de transitions** → meilleure efficacité spectrale que le codage Manchester.
- **Réduction du contenu haute fréquence** → spectre plus étroit, moins de brouillage.
- **Avantages du Code de Miller :**
 - **Synchronisation fiable** avec un nombre limité de transitions.
 - **Efficacité spectrale améliorée** grâce à la réduction des impulsions rapides et la densité de puissance mieux concentrée.