Chapitre 2 : Techniques de transmission

Z:\Polys\Internet de base (pour L2 Electronique)\2.Transmission.fm - 16 février 2006 17:45

Plan

- Introduction
- Phénomènes caractéristiques
- Les éléments de la transmission
- La modulation
- Le codage
- Conclusion

Bibliographie

- A. Tanenbaum, Réseaux, InterEditions, 1997.
- H. Nussbaumer, Téléinformatique - tome 1, Presses polytechniques romandes, 1987.
- C. Macchi, J-F.Guibert, Téléinformatique, Dunod, 1983.
- S. Pierre, M. Couture, Télécommunications et transmission de données, Eyrolles, 1993.
- A. Glavieux, M. Joindot, Communications numériques, Masson, 1996.

1. Introduction

Les supports de communication ne sont pas parfaits.

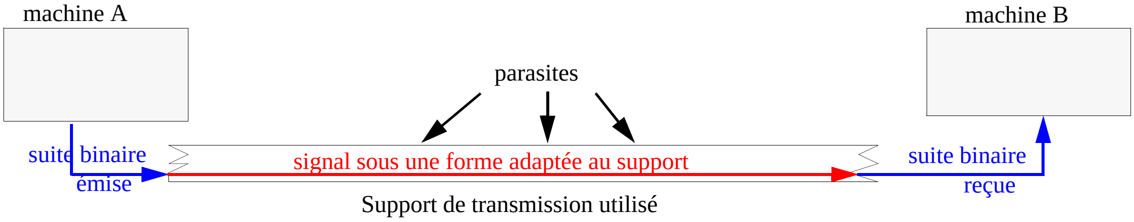
- les principaux phénomènes : affaiblissement, déphasage, bruits.

Les défauts du support limitent la transmission (débit et étendue)

→ Adapter les techniques de transmission aux caractéristiques du support !

Deux grandes techniques de transmission :

- transposition en fréquence (modulation en fréquence, amplitude ou phase)
- en bande de base : codes de transmission de données

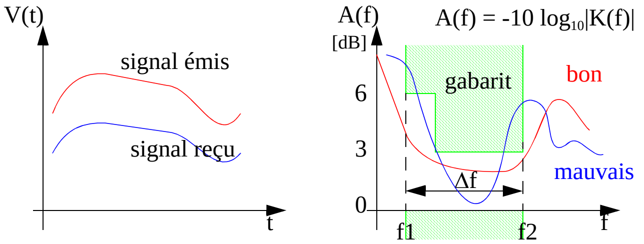


2. Phénomènes caractérisant les supports de communication

2.1. Affaiblissement

Transformation de l'amplitude du signal : V $e^{2i\Pi ft} \rightarrow |K(f)|.V\ e^{2i\Pi ft}$

- analyse temporelle et fréquentielle d'un signal transmis (spectre fréquentiel) :



L'affaiblissement croît plus vite que la distance.

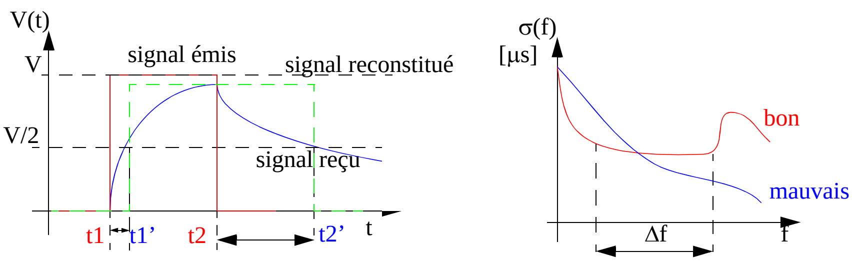
- amplificateur de signal dans la liaison (de gain 1/|K(f)|).

L'affaiblissement varie en fonction de la fréquence :

- ex : proportionnel à √f sur les paires métalliques.
- utilisation du support dans la plage de fréquences où l'affaiblissement est constant :
  - la largeur de la bande passante du support (Δf = f2-f1) !

2.2. Le déphasage

Déformation de la phase du signal : V $e^{2i\Pi ft} \rightarrow$ V $e^{2i\Pi ft - i\phi(f)}$



Le déphasage varie en fonction de la fréquence !

- temps de propagation de groupe σ(f) = 1/2Π . dΦ(f)/df
- détection difficile des instants significatifs (l'horloge) : $t_1' - t_1 \neq t_2' - t_2$
- utilisation d'une plage de fréquence où le déphasage est constant

2.3. Les phénomènes perturbateurs

Bruit blanc : agitation thermique,

- de faible puissance,
- sur une large plage de fréquences.

Bruit impulsif : organes électromécaniques, microcoupures

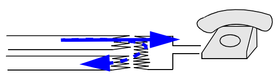
- forte puissance,
- durée faible,
- peu présent dans les réseaux numériques.

Diaphonie : couplage parasite entre lignes voisines - influence électromagnétique

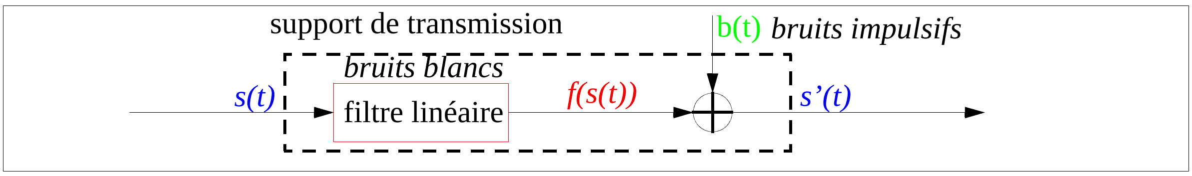
- placement des câbles, blindage, fibre optique !

Echo : réflexion du signal due à une désadaptation d'impédance

- suppresseur d'écho.
- ex : câblage téléphonique 4 fils/2 fils



2.4. Modélisation du support de transmission



La bande passante d'un support de communication correspond à la plage de fréquences où il présente les meilleurs caractéristiques de transmission.

- où le gain est non nul ! (gain = 1/affaiblissement)
- malheureusement le gain n'est jamais tout-à-fait nul (et varie en fonction de la fréquence) !
- la "Federation Communications Commission" définit la bande passante d'un signal comme la plage de fréquences la plus étroite possible qui contient 99 % de l'énergie d'un signal

La bande passante à n décibels (dB) est la plage de fréquences dans laquelle le rapport signal sur bruit (noté S/B) vérifie :

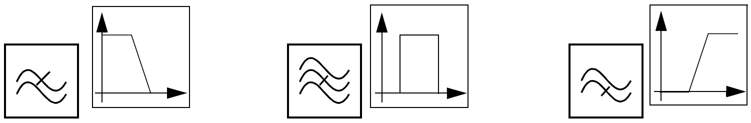
- S/B à n dB : $10 \log_{10}(Ps/Pb) \leq n$,
  où Ps est la puissance du signal et Pb est la puissance du bruit.

Tableau 1 : quelques valeurs approchées en décibel

x	1/4	1/2	1	2	4	10	100	1000
10 log x (db)	-6	-3	0	3	6	10	20	30

Trois principaux types de filtres :

- filtres passe-bas,
- filtres passe-bande
- et filtres passe-haut.



La formule de *Shannon* [1948]

- donne le débit théorique maximum d'un support soumis à du bruit :

$$D = W.\log_2(1+ Ps/Pb)$$

. où D est exprimé en bit/s
. W, exprimé en Hertz (Hz), représente la bande passante du support,
. Ps, la puissance du signal et Pb, la puissance du bruit.

Exemple : le débit maximum théorique d'une ligne téléphonique [300 à 3400 Hz] admettant un rapport signal sur bruit de 30 dB est de : $(3400-300).\log_2(1+10^{30/10}) \approx 30$ Kbit/s

3. Éléments intervenant dans la transmission

3.1. Les principaux éléments

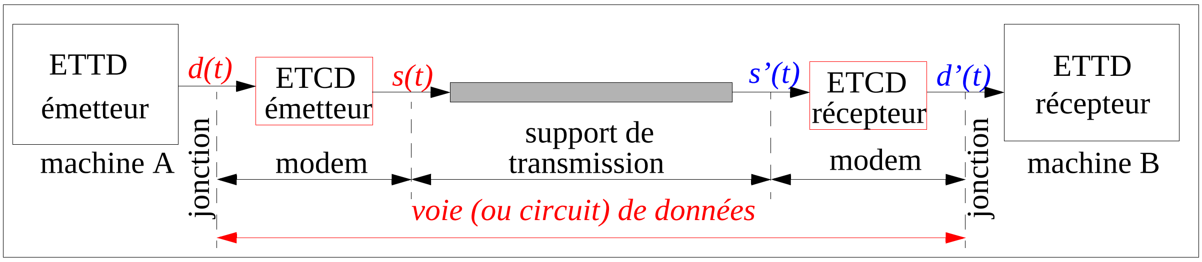
L'ETCD (équipement terminal de communication de données)

- équipement spécifique chargé d'adapter les données à transmettre au support de communication

L'ETTD (équipement terminal de traitement de données)

- l'ordinateur !

Le support de transmission

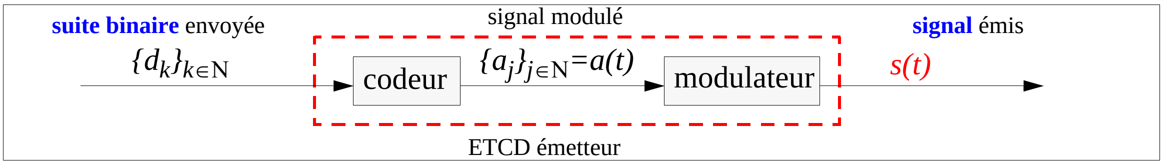


3.2. Fonctions de l'ETCD

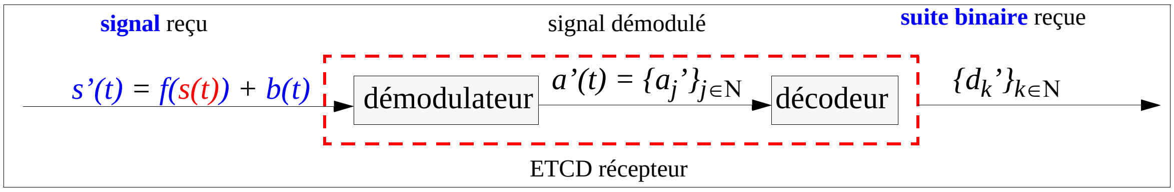
Deux transformations fondamentales sont définies :

- le codage : bits → symboles
- la modulation : symboles → signal
  - les symboles peuvent être une fonction continue ou une suite de valeurs
  - la modulation appliquée peut être très simple (pour le codage en BdB)

A l'émission



A la réception



4. Modulation

Le modulateur transforme un signal initial quelconque $a(t)$ en un signal $s(t)$ adapté au support de communication employé.

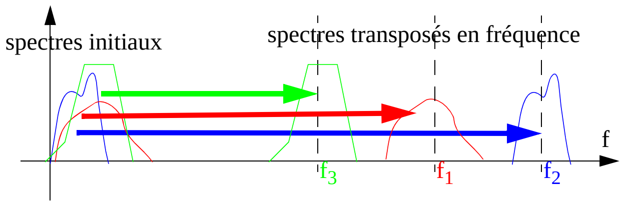
Le signal $s(t)$ est obtenu en faisant varier les paramètres d'une onde généralement sinusoïdale

- $s(t) = A \cos(2 \pi f t - \Phi)$.
  - le signal sinusoïdal est généralement centré autour d'une fréquence f_o appelée onde de référence ou porteuse

Trois types élémentaires de modulation par transposition en fréquence:

- modulation d'amplitude (lorsque les variations portent sur A)
- modulation de fréquence (lorsque les variations portent sur f)
- modulation de phase (lorsque les variations portent sur Φ)

La transposition en fréquence autorise le multiplexage fréquenciel :



Lorsque la fonction de modulation existe la transmission est dite analogique. En fait de ce cas, on a une transformation d'une fonction continue en une autre fonction continue.

La transmission est dite en bande de base lorsque le signal ne subit pas (peu) de transposition en fréquence. Dans ce cas, le signal présente souvent un aspect rectangulaire car la fonction de modulation simple utilisée est rectangulaire.

On peut transformer une fonction discrète $\{d_k\}$ en fonction continue d(t) à l'aide de la relation suivante :

$$d(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} d_k \cdot R_T(t - kT - \tau_0)$$

τ_0 étant l'instant initial, la rapidité de modulation étant 1/T et $R_T(t)$ étant la fonction rectangulaire sur l'intervalle [0,T] définit ainsi :

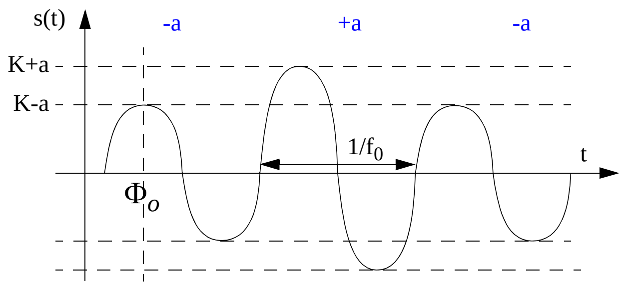
$$R(t) = \begin{cases} 1, t \in [0, T] \\ 0, t \notin [0, T] \end{cases}$$

Par abus de langage, on parle de transmission numérique lorsque une fonction discrète (suite binaire) est transformée en fonction continue lors de l'émission et réciproquement lors de la réception.

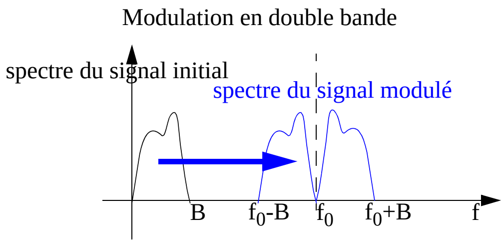
4.1. Modulation d'amplitude

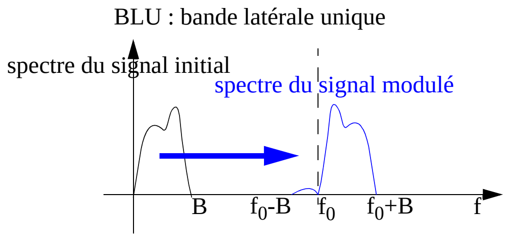
Signal : $s(t) = A(t) \cos(2 \pi f_o t - \Phi_o)$

- *avec* $A(t) = K + a(t)$ *et* $a(t) \in \{-a,+a\}$ ... *ou* $a(t) \in [-a,+a]$!



Technique électroniquement simple mais sensible au bruit.

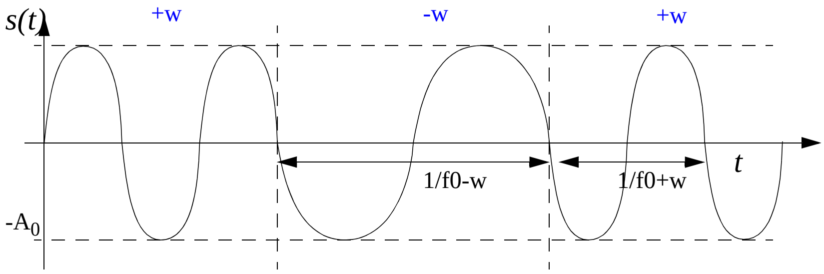




4.2. Modulation de fréquence

Signal : $s(t) = A_0 \cos(2 \pi f(t)\, t - \Phi_o)$

- *avec* $f(t) = f_0 + a(t)$ *et* $a(t) \in \{-w,+w\}$*... ou* $a(t) \in [-w,+w]$ *!*



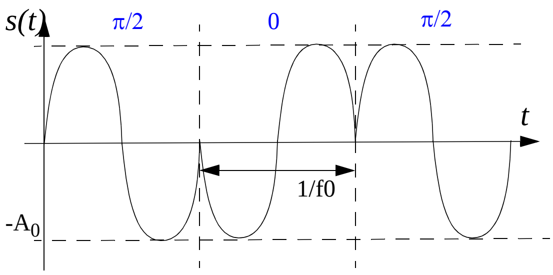
Difficulté à maintenir la phase.

Utilisée, naturellement, par la technique de multiplexage fréquentiel.

4.3. Modulation de phase

Signal : $s(t) = A_0 \cos(2 \pi f_o t - \Phi(t))$

- *avec* $\Phi(t) = \Phi_0 + a(t)$ *et* $a(t) \in \{\Pi k/n\}$ pour n symboles ... *ou* $a(t) \in [-\Pi,+\Pi]$ *!*



4.4. Modulation combinée

Modulation en quadrature (MAQ)

- modulation en phase et en amplitude
- par exemple :

codage MAQ	A_0	A_1
$\Phi_0 = \pi/2$	00	01
$\Phi_1 = -\pi/2$	10	11

5. Le codage

Le codeur transforme une suite $\{d_k\}_{k\geq 0}$ initiale généralement binaire (de bits) en une suite codée $\{a_k\}_{k\geq 0}$ (de symboles) généralement binaire ou ternaire.

Le décodeur fait l'opération inverse.

Le but du codage est d'adapter la suite de bits à transmettre aux caractéristiques de la transmission.

S'il n'y a pas de modulation par transposition en fréquence, le codage est dit en bande de base :

- la plage de fréquences utilisée par le signal issu de la suite codée est la même que celle de la suite initiale.
- dans ce cas, le modulateur module à partir d'une fonction rectangulaire ($R_T(t)$).
  - $\{a_k\}_{k\geq 0} \rightarrow a(t)$

5.1. Débit binaire et rapidité de modulation

Le débit binaire D d'une voie de données est le nombre maximum de bits d_i transmis par seconde sur cette voie.

$$D = \frac{1}{T} \text{ bit/s}$$

La rapidité de modulation R (exprimée en bauds) mesure le nombre maximum de symboles (éléments de modulation) transmis par seconde

$$R = \frac{1}{\Delta} \text{ baud}$$

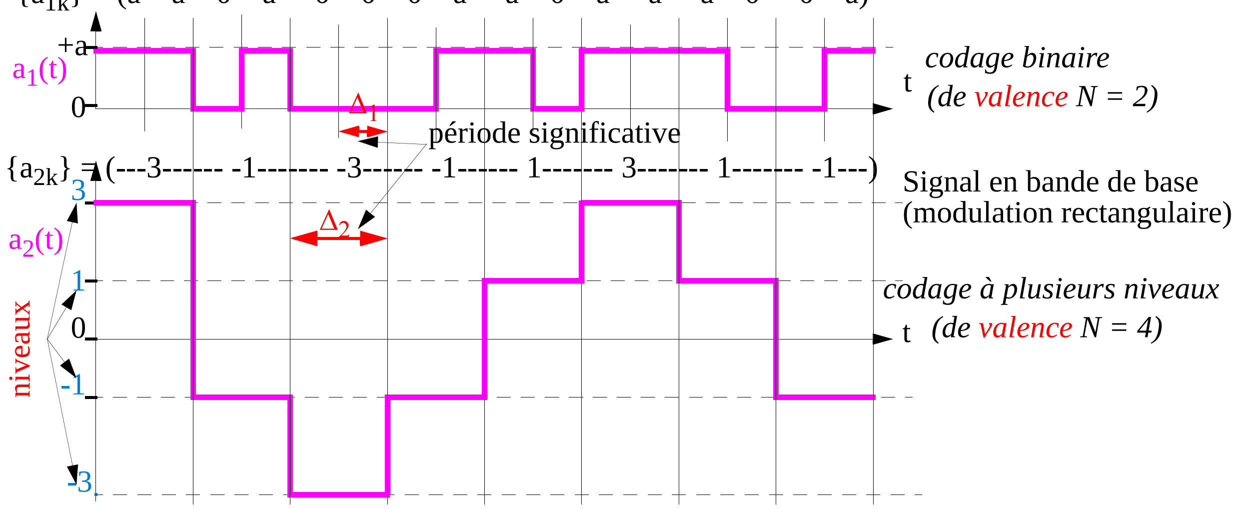
Remarque : généralement, $1/\Delta$ est un multiple de $1/T$ et le nombre de niveaux N est choisi de telle sorte que a(t) et d(t) aient le même débit d'information. On a alors :

$$D = \frac{1}{T} = \frac{\log_2(N)}{\Delta} = R.\log_2(N) \text{ bits/s}$$

Exemples :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale

$\{a_{1k}\}$ = (a---a---0---a--- 0---0---0---a--- a---0---a--- a--- a---0--- 0---a)



5.2. Les principales qualités d'un code

- largeur de sa plage de fréquences (spectre fréquentiel)
  - . la plus étroite possible
- répartition fréquentielle de la puissance
  - . peu de puissance aux faibles fréquences, aucune à la fréquence nulle, là où les caractéristiques du support ont les meilleurs
- codage de l'horloge
  - . synchronisation de l'horloge du récepteur sur le signal reçu,
  - . fréquence suffisante des transitions
- résistance au bruit
  - . espacement des niveaux
- complexité du codage
  - . coût et vitesse de codage
- dépendance à la polarité
  - . facilité d'installation
- équilibrage
  - . mesure approximative de l'influence du codage sur des symboles successifs : la puissance dissipée par les tensions positives doivent être égales à celle des tensions négatives ... pour n'importe quelle suite binaire
  - . Running Digital Sequence : $RDS(\{a_k\}) = \Sigma_k a_k$.
  - . $\Delta RDS(\{a_k\}) = max(abs\{RDS(\{a_j\})$ tel que $\{a_j\}$ sous-suite valide de $\{a_k\}\})$.

5.3. Les codes usuels utilisés en bande de base

Les codes à deux niveaux (binaire) par bit:

- code NRZ ("Non Return to Zero")
- code NRZI ("Non Return to Zero Invert")
- code biphase
- code biphase différentiel
- code de Miller

Les codes à trois niveaux (ternaire) par bit:

- code RZ ("Return to Zero")
- code bipolaire (simple)
- code bipolaire entrelacé d'ordre 2
- codes bipolaires à haute densité d'ordre n (BHDn)

Les codes par bloc :

- code nB/mB
- code nB/mT

5.4. Code NRZ ("Non Return to Zero")

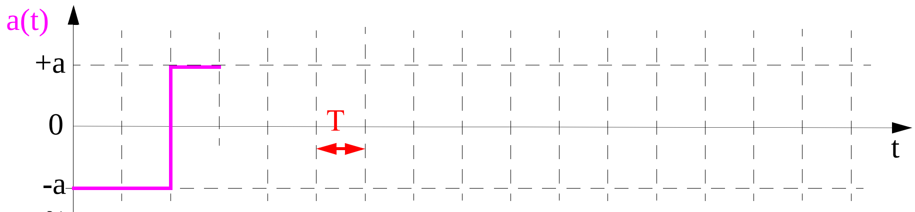
$$\begin{cases} (d_k = 0) \Leftrightarrow (a_k = [a]) \\ (d_k = 1) \Leftrightarrow (a_k = [-a]) \end{cases}$$

0 ⇔
1 ⇔

Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale

Codage NRZ



RDS($\{a_k, 1<k<i\}$)= -a, -2a, -a, -2a, -a , 0 _, +a, 0_, -a , 0_, -a , -2a,-3a, ..._

Code binaire simple, utilisé couramment entre l'ordinateur et ses périphériques.

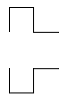
ΔRDS(NRZ) =∞

spectre : $X(f) = T \cdot (a \cdot \sin(\Pi f t) / \Pi f t)^2$

5.5. Code RZ ("Return to Zero")

$$\begin{cases} (d_k = 0) \Leftrightarrow (a_k = [-a,0]) \\ (d_k = 1) \Leftrightarrow (a_k = [a,0]) \end{cases}$$

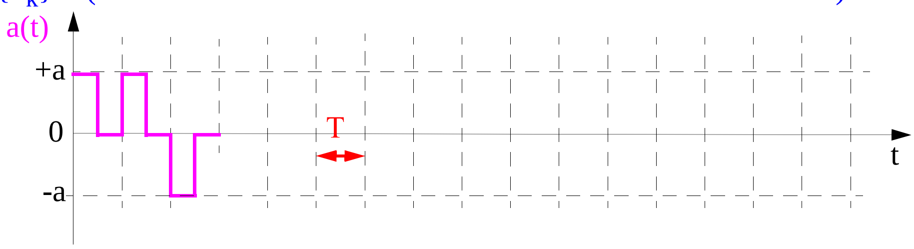
1 ⇔
0 ⇔



Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale

Codage RZ



Code ternaire simple, limite les interférences entre symboles, codage de l'horloge

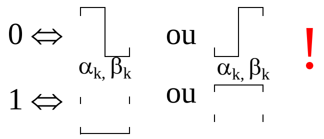
ΔRDS(RZ) =$\infty / 2$!

$\rightarrow$ codage 1B/2T

$$\begin{cases} 0 \Leftrightarrow (-1,0) \\ 1 \Leftrightarrow (1,0) \end{cases}$$

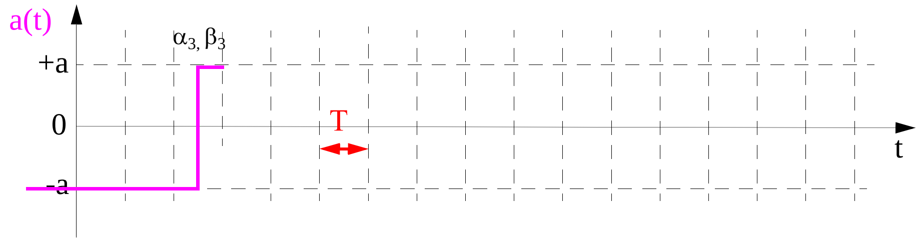
5.6. Code NRZI (Non Return to Zero Invert)

$$\begin{cases} (d_k = 0) \Leftrightarrow (a_k = [\alpha_k,\beta_k]) / ((\alpha_k \neq \beta_k) \wedge (\alpha_k = \beta_{k-1})) \\ (d_k = 1) \Leftrightarrow (a_k = [\alpha_k,\beta_k]) / ((\alpha_k = \beta_k) \wedge (\alpha_k = \beta_{k-1})) \\ \qquad (\alpha_k \in \{a, -a\}, (\beta_0 = -a)) \end{cases}$$



Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale



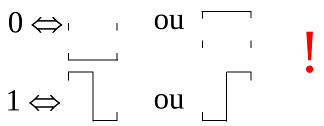
Codage NRZI

Code binaire, indépendant de la polarité, adapté à la transmission photonique, peu dense.

ΔRDS(NRZI) = ∞

5.7. Code de Miller

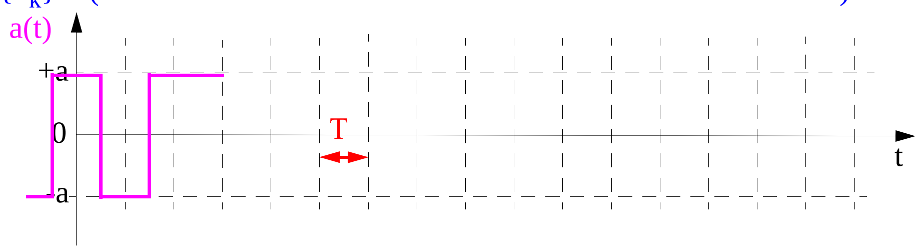
$$\begin{cases} (d_k = 0) \Leftrightarrow (a_k = [\alpha_k,\beta_k]) / ((\alpha_k = \beta_k) \wedge (\alpha_k \neq \alpha_{k-1})) \\ (d_k = 1) \Leftrightarrow (a_k = [\alpha_k,\beta_k]) / ((\alpha_k \neq \beta_k) \wedge (\alpha_k = \beta_{k-1})) \\ \qquad (\alpha_k \in \{a, -a\}, (\alpha_0 = -a), (\beta_0 = a)) \end{cases}$$



Autres dénominations : “modified FM”, DM : “Delay modulation”

Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale



Codage de Miller

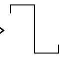
Code binaire dense, complexe, conservation de l’horloge et indépendance de la polarité.

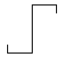
ΔRDS(Miller) = 3a/2

On peut le construire à partir du code biphase en supprimant une transition sur deux.

5.8. Code biphase

$$\begin{cases} (d_k = 0) \Leftrightarrow (a_k = [a,-a]) \\ (d_k = 1) \Leftrightarrow (a_k = [-a,a]) \end{cases}$$

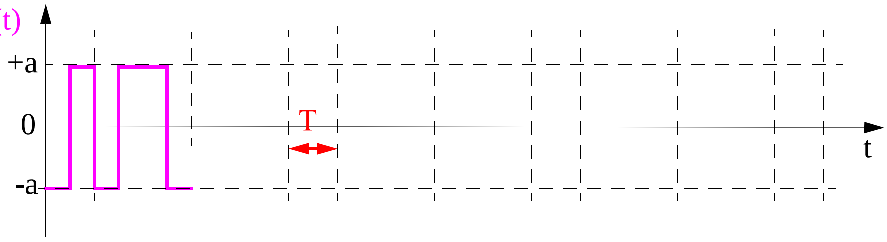
0 ⇔ 

1 ⇔ 

Autres dénominations : Manchester, biphase_L(evel), → codage 1B/2B.

Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale



Code binaire, équilibré, conservation de l'horloge, mais spectre très large (le double).

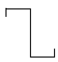
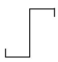
ΔRDS(biphase) = 0 !

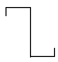
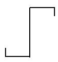
Spectre : $X(f) = T \cdot ((2a)/(\Pi f t))^2 \cdot \sin(\Pi f t/2)^4$

Codage utilisé par Ethernet.

5.9. Code biphase différentiel

$$\begin{cases} (d_k = 0) \Leftrightarrow (a_k = [\alpha_k,\beta_k])/((\alpha_k \neq \beta_k) \wedge (\alpha_k \neq \alpha_{k-1})) \\ (d_k = 1) \Leftrightarrow (a_k = [\alpha_k,\beta_k])/((\alpha_k \neq \beta_k) \wedge (\alpha_k = \alpha_{k-1})) \\ (\alpha_k \in \{a,-a\}, (\alpha_0 = -a), (\beta_0 = a)) \end{cases}$$

0 ⇔  ou 

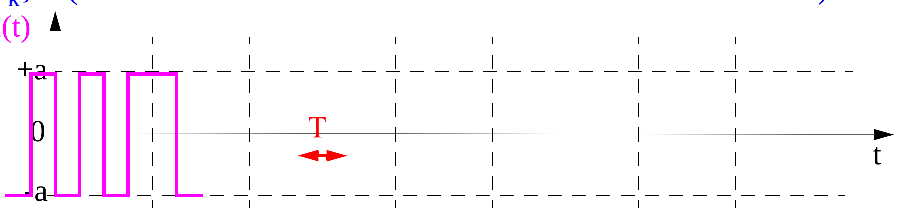
1 ⇔  ou 

!

Autres dénominations : Manchester différentiel, FSK : “frequency shift keying”, FM : “frequency modulation”, biphase_M(ark) ou biphase_S(pace)

Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale



Identique au code Manchester + indépendance de la polarité.

Problème s'il y a corruption d'un des symboles : la suite est mal décodée.

ΔRDS(biphase_diff) = 0

Codage utilisé par Token Ring.

5.10. Code bipolaire simple

- notation : d^1_j le j^{ème} bit de la sous-suite des bits à 1

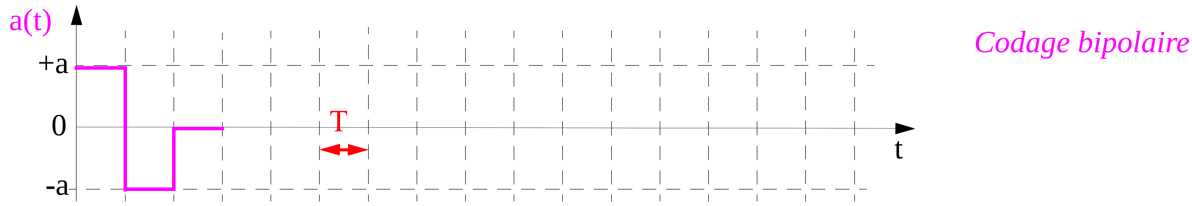
0 ⇔
1 ⇔


$$\begin{cases}(d_k = 0) \Leftrightarrow (a_k = 0)\\ (d_k = 1) \in d^1_m \Leftrightarrow \begin{cases}(a_k = [a]) / m = 2n+1, (n \in N)\\ (a_k = [-a]) / m = 2n, (n \in N)\end{cases}\end{cases}$$

Autres dénominations : AMI “Alternate Mark Inversion”

Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale



Code ternaire, équilibré, indépendant de la polarité, dérive de l’horloge (suite de 0).

Spectre : $X(f) = T \cdot (a / (\Pi f t))^2 \cdot \sin(\Pi f t)^4$

ΔRDS(bipolaire) = a

Utilisé par le système de téléphonie numérique PCM sur le ligne de transmission T1 (nécessite la suppression des longues suites de 0).

5.11. Code bipolaire entrelacé d’ordre 2

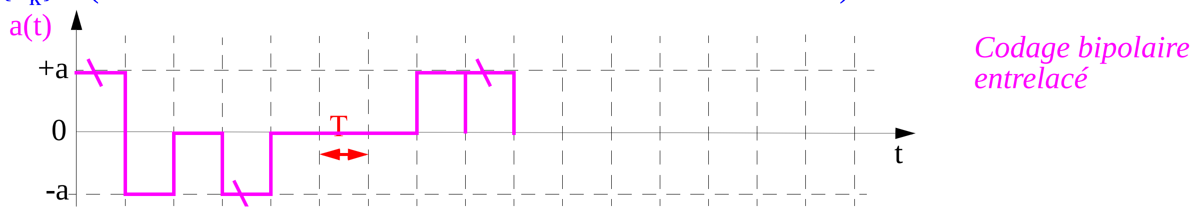
- Construction de 2 sous-suites à partir de la sous-suite des bits à 1 :
  - la sous-suite des 1 pairs et celle des 1 impairs.
- Chaque sous-suite est indépendamment codée en alternance.

0 ⇔
1 ⇔


!

Exemple :

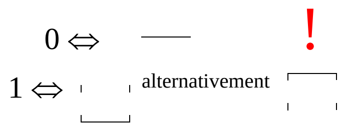
$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---1---1---0---1--- 1--- 1---0--- 0---1) suite binaire initiale



Spectre très étroit, code complexe qui ne résout pas le problème lié aux longues suites de 0. Les longues suites de 1 présentent un battement dont la fréquence est réduite (de moitié) par rapport au codage bipolaire simple.

Généralisation possible aux codes bipolaires entrelacés d’ordre *n*.

5.12. Code bipolaire haute densité d'ordre *n* (BHD *n*)



Même codage que le code bipolaire + une transformation des suites de plus de *n* zéros.

- basée sur la violation de l'alternance : bit de viol (noté V)

Une suite consécutive de *n+1* bits à 0 est codée par :

(a) suite de *n* zéros suivis d'un bit de viol : [000...00] → [000...0V]
(b) suite formée d'un bit de bourrage (noté B), *n-1* zéros, suivis d'un bit de viol; les bits B et V ayant même polarité : [000...00] → [B00...0V]

Pour assurer l'équilibrage :

On choisit la forme (a) si le nombre de bits à 1 suivant le dernier bit de viol est impair, la forme (b) sinon.

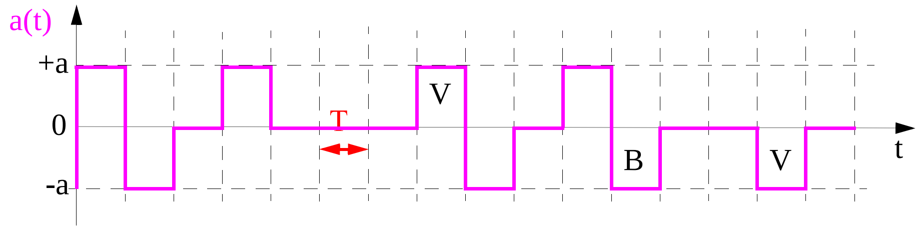
Remarques :

. le premier bit à un (suivant un bit de viol) est codé avec la valeur inverse du bit de viol qui le précède
. on considère que la suite est conventionnellement précédée d'un bit de viol.
. dans une très longue suite de zéros tous les blocs successifs (sauf parfois le premier) sont codés dans la forme (b).

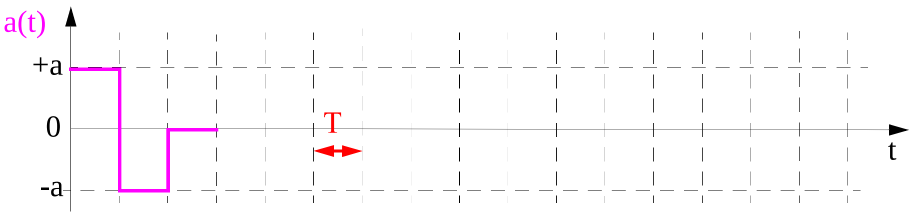
ΔRDS(BHD3) = 2a

Exemple :

$\{d_k\}$ = (1---1---0---1--- 0---0---0---0---1---0---1--- 0--- 0---0--- 0---0) suite binaire initiale



Codage BHD3



Codage BHD2

5.13. Remarques

La plupart de ces codes acceptent plusieurs variantes. Par exemple en inversant la convention de codage de la parité (0/1) ou en modifiant les conditions initiales.

5.14. Codes par blocs

Code chaque bloc de *k* bits par un bloc de *n* symboles pris dans un alphabet de taille L. L'alphabet étant généralement binaire, ternaire, ou plus rarement quaternaire (noté resp. B, T, Q).

- On a la relation : $2^k \leq L^n$
- Notation : *k*B/*n*L, par exemple 4B/5B

Tableau 2 : quelques encodages de symboles FDDI

0	1	2	3	4	5	...	F	Idle	J	K	R	S	Halt	Quiet
11110	01001	10100	10101	01010	01011	...	11101	11111	11000	10001	00111	11001	00100	00000

Certains codes précédents peuvent être perçus comme des codes par blocs (surtout si le bloc à coder est réduit à un seul bit).

- Exemple : RZ $\in$ 1B/2T, biphase $\in$ 1B/2B

L'efficacité de ces codes peut être faible ($2^k/L^n$).

Ces codes servent à éliminer les suites de symboles impropres à la transmission, lors de précodage :

- La modulation est généralement effectuée ultérieurement en utilisant un des codes simples précédents.
  - Exemple : FDDI = 4B/5B + NRZI

6. Conclusion

Adaptation des techniques de transmission aux caractéristiques du support de communication.

La modulation par transposition en fréquence :

- module des signaux analogiques ou numériques.

De très nombreux codes de transmission existent (NRZ, biphase, bipolaire, etc.), chacun possédant certaines des caractéristiques voulues, mais pas toutes.

Ne pas confondre avec les codes de transmission (appelés “channel coding”) avec les codes applicatifs (appelés “source coding”) :

- de protection contre les erreurs (détection et auto-correction).
- de compression (LZW, RLE, ZIP, etc.).
- de représentation (ASCII, DCB, complément à 2, ASN-1/BER, etc).
- de chiffrement (DES, RSA, PGP, etc.).
- d'authentification et d'intégrité (MD5, SHA-1, etc.).
- de hachage (“hash code”).
- d'embrouillage.
- etc.

Les techniques de transmission ne suffisent pas à assurer que les communications se déroulent sans aucune erreur. C'est pourquoi des techniques de protection contre les erreurs sont développées.