

Introduction au traitement du signal

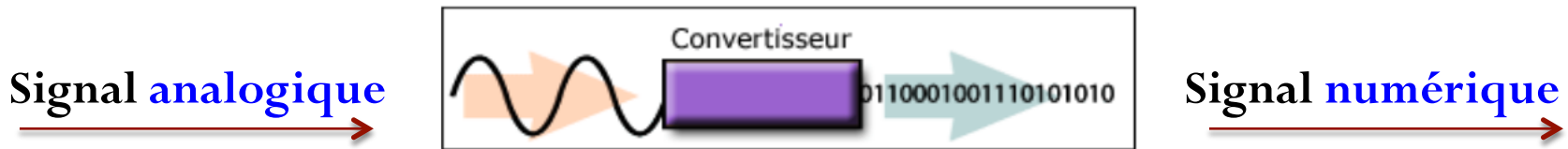
◆ Cours + TD: 10h30

Introduction

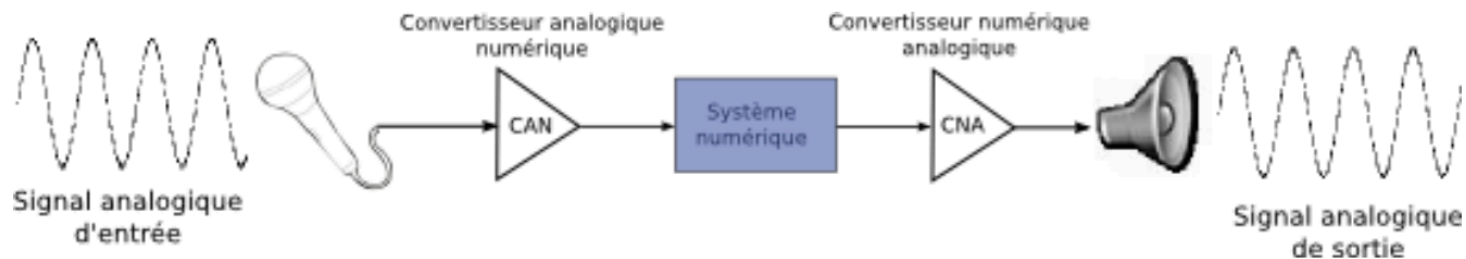
- ◆ **Théorème de Shannon**
- ◆ **Conversion analogique/numérique**

Conversion analogique/numérique

- ◆ Un signal **analogique** est un ensemble continu d'informations.
- ◆ Un signal **numérique** est un ensemble discret.



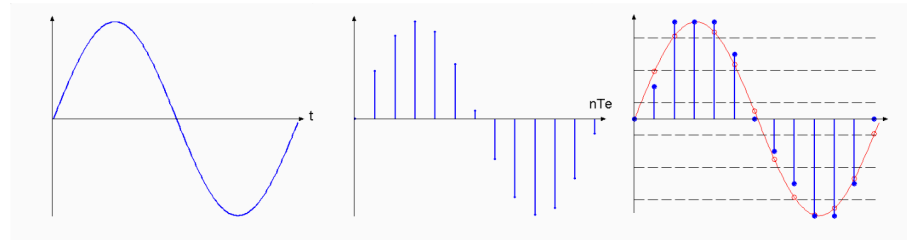
Exemple:



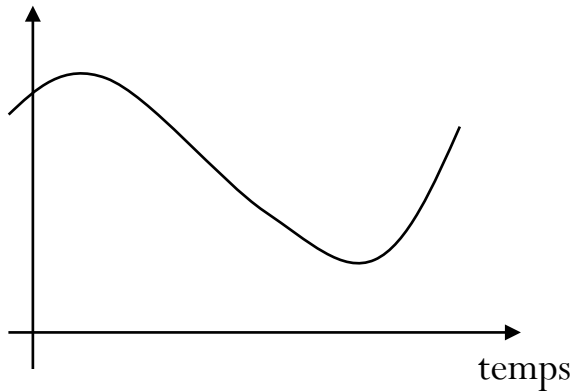
Fe = fréquence d'échantillonnage,
nombre d'échantillons du signal
analogique prélevés par seconde

Echantillonnage
discrétisation de
l'axe des abscisses

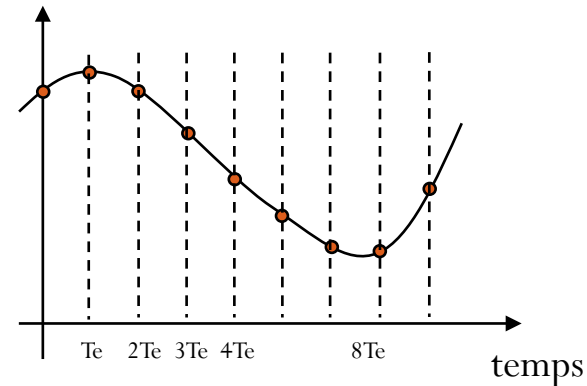
Quantification
discrétisation de
l'axe des ordonnées



Signal analogique ([audio](#))



Signal échantillonné ([audio](#))



Théorème de Shannon

$$F_e = 2F_{\max}$$

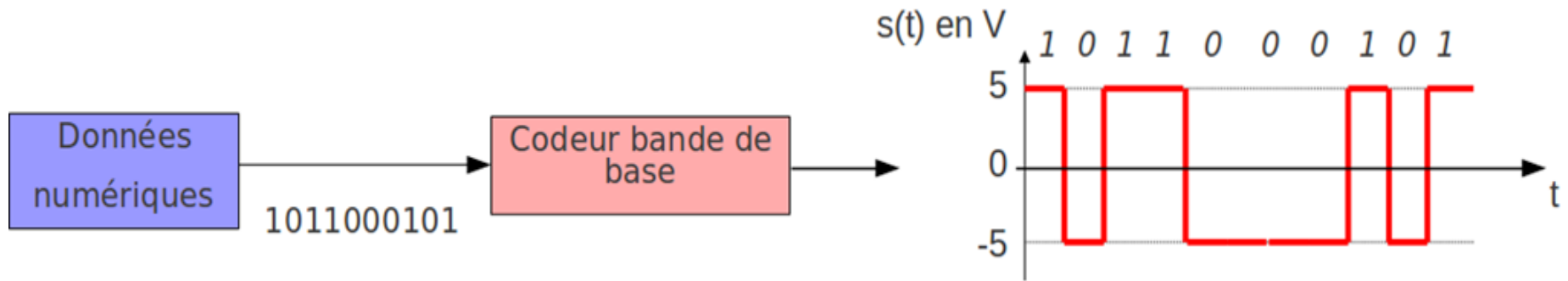
Théorème: pour échantillonner, sans perte d'information, un signal analogique dont le spectre est borné à $F_{\max}$, il faut choisir une fréquence d'échantillonnage **Fe supérieure ou égale à $2F_{\max}$** .

La transmission des signaux numériques en bande de base

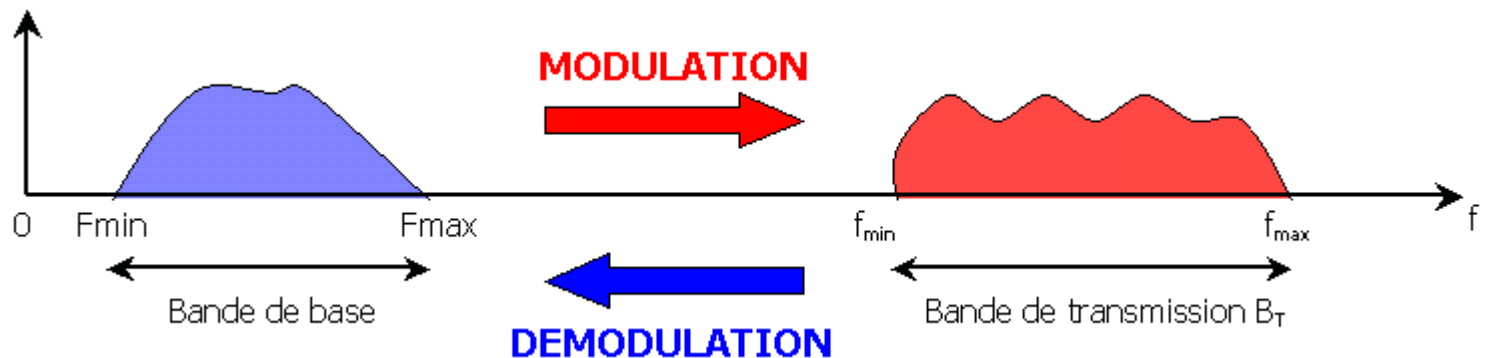
- ◆ **Principe**
- ◆ **Codages en bande de base**
- ◆ **Détection/Correction des erreurs**

Transmission bande de base / bande transposée

Bande de base : les bits sont transformés en niveaux physiques par un code en ligne puis le signal est transmis tel quel sur le support → transmission sur de **courtes** distances.



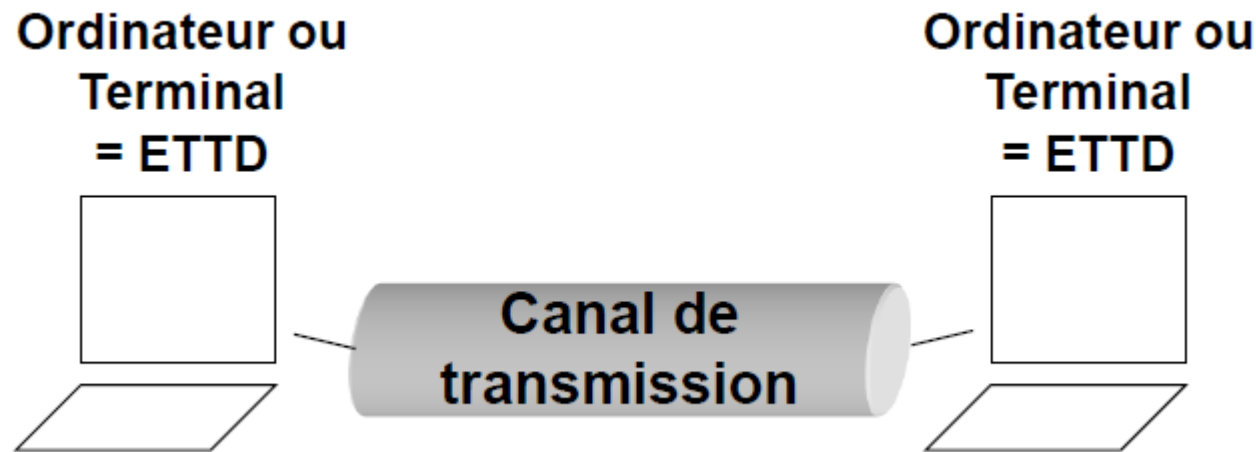
Bande transposée : après codage, le spectre du signal est transposé en fréquence (opération de modulation) → transmission sur de **longues** distances.



Transmission en bande de base

Le signal transmis est numérique.

Adapté aux courtes distances.



Canal de transmission = support physique
(câble coaxial, fibre optique, ...)

ETTD = Equipement Terminal de Transmission de Données

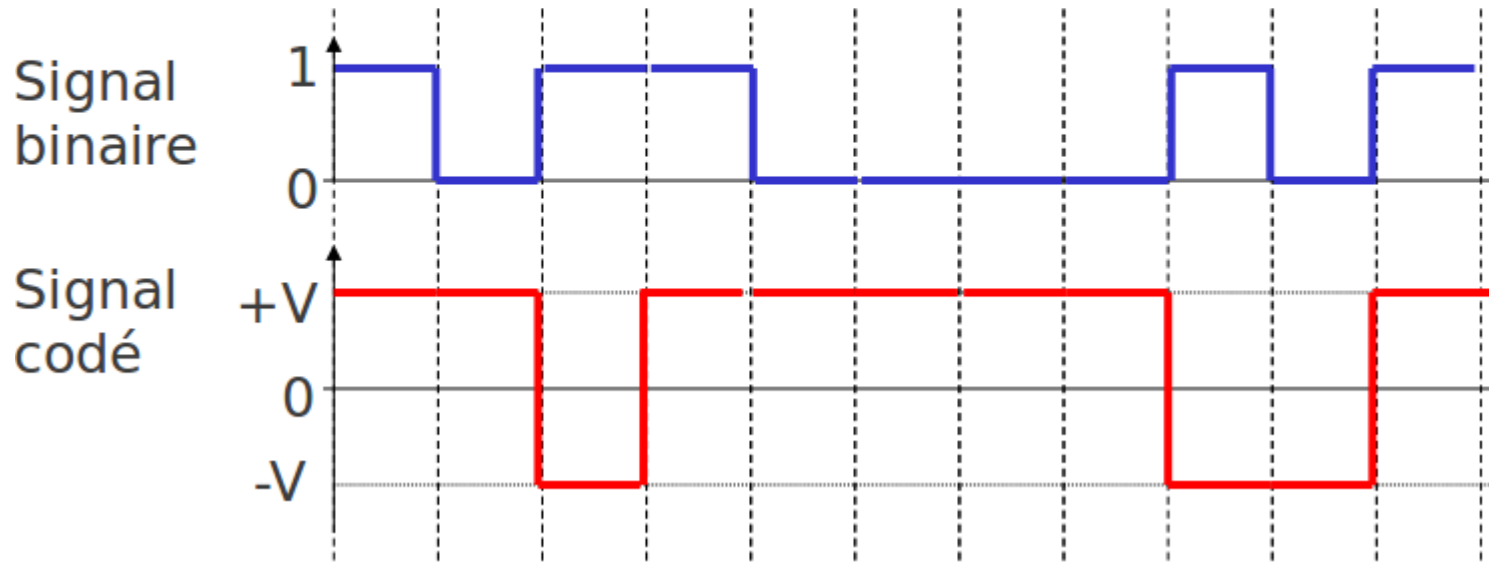
Nécessité d'une adaptation du signal numérique

Il est nécessaire d'adapter (i.e., de coder) le signal numérique provenant d'un ETTD pour les raisons suivantes :

- 1) Le signal numérique présente une **composante continue non nulle**. Cette composante ne transporte aucune information, et ne provoque qu'un échauffement dû à l'effet Joule. Il faut donc diminuer sa valeur.
- 2) Du fait de l'absence de transition, lors de la transmission d'une longue suite de niveaux logiques bas ou hauts, un **risque de perte de synchronisation des horloges** apparaît.
- 3) Le spectre d'un signal binaire est concentré sur les **fréquences basses qui sont affaiblies** par le support de transmission.

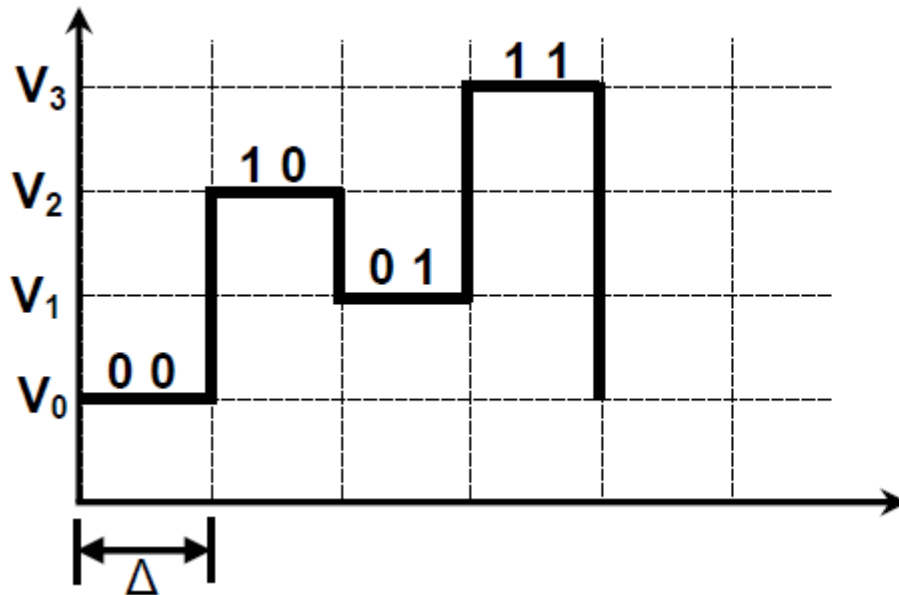
Notion de valence

La valence: notée V , est le nombre de valeurs que peut prendre l'état physique à un instant t .



Notion de valence

La valence: notée V , est le nombre de valeurs que peut prendre l'état physique à un instant t .



00 est représenté par V_0
01 est représenté par V_1
10 est représenté par V_2
11 est représenté par V_3

Débit binaire et rapidité de modulation

Rapidité de modulation : On appelle rapidité de modulation (baud rate) le *nombre d'intervalle significatif du signal par unité de temps*.

Si Δ est la durée de l'intervalle significatif (exprimé en seconde) la rapidité de modulation noté généralement R est égale à $1 / \Delta$.

L'unité de rapidité de modulation est le *baud*

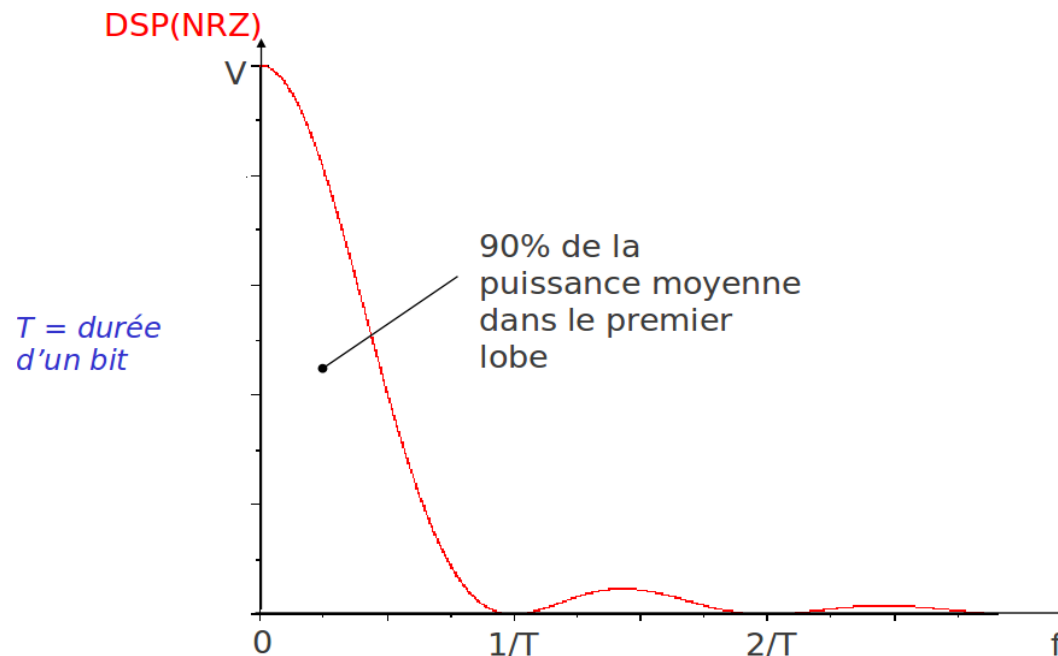
Débit binaire : D est le nombre d'éléments binaires (bits) émis par seconde sur le support de transmission. L'unité de débit binaire est le bit par seconde (bit/s ou bps). Si T est le temps d'un bit on aura donc $D = 1/T$ bit/s

$$D = R \log_2(V)$$

Densité spectrale de puissance

Problème : on ne peut calculer le spectre (transformée de Fourier) d'un signal non déterministe.

⇒ Evaluation **probabiliste** de la répartition de la puissance d'un signal non périodique dans le domaine fréquentiel :
Densité Spectrale de Puissance (DSP)



Le code NRZ (Non Retour à Zéro)

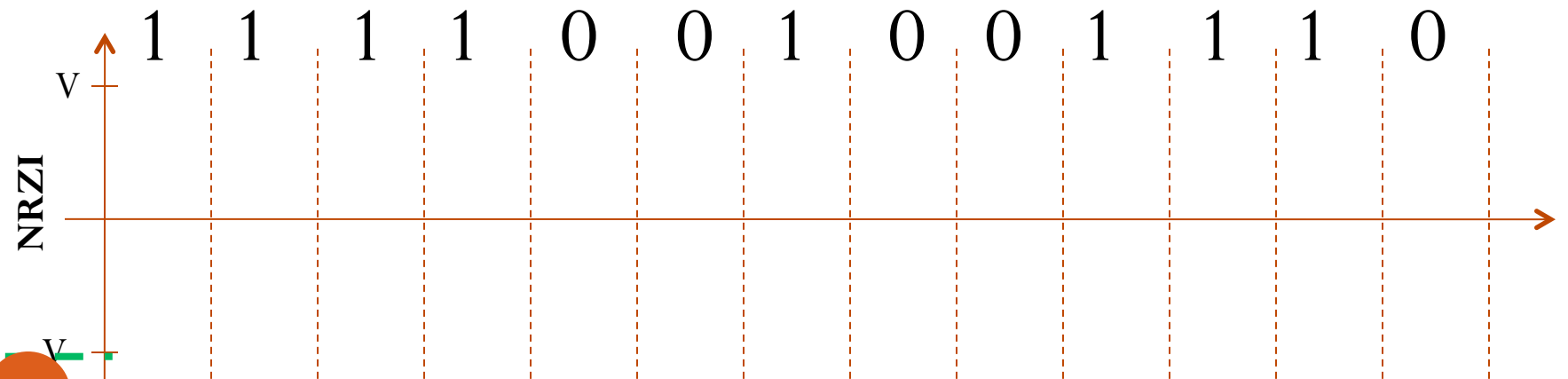
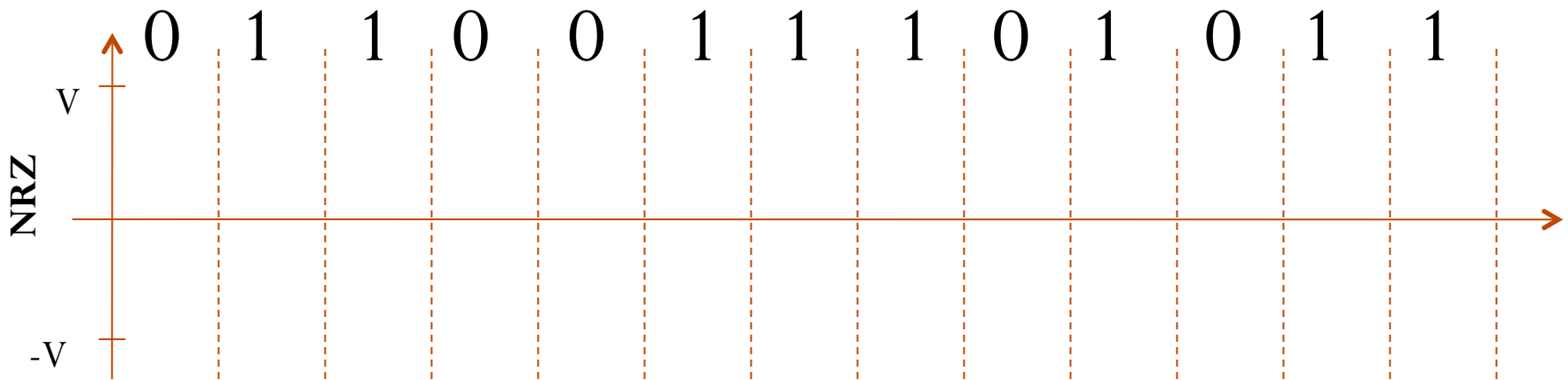
Le **codage NRZ** permet une symétrie de la valeur des niveaux logiques hauts et bas, par rapport à un niveau de potentiel nul.

Niveau logique	codage NRZ
BAS	$-V$
HAUT	$+V$

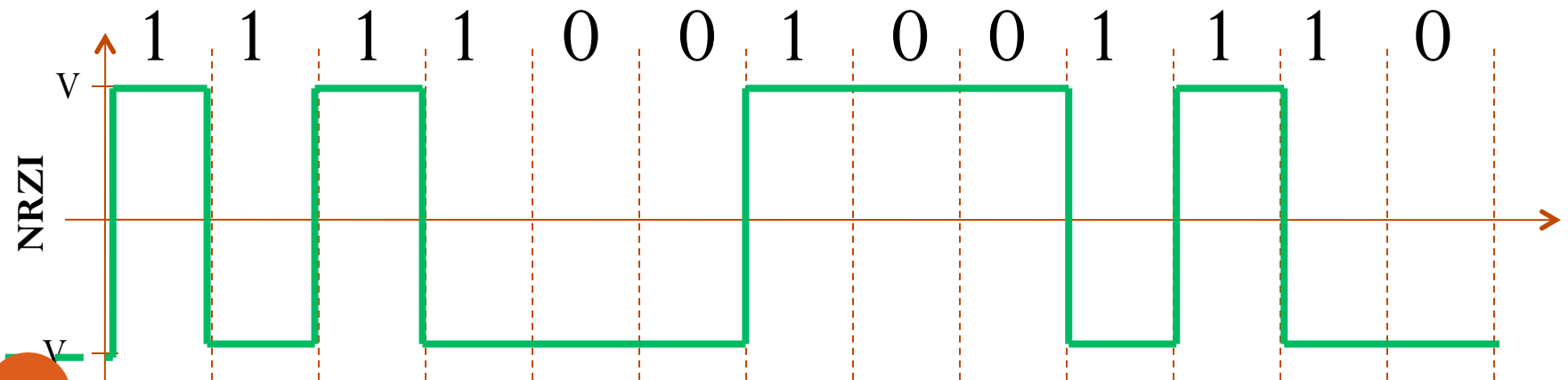
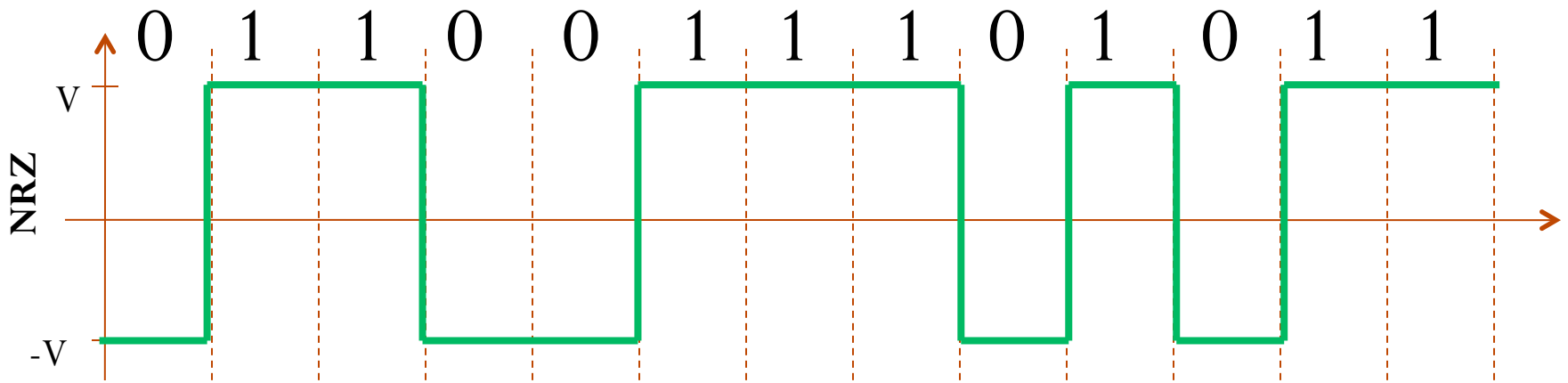
Dans le **codage NRZI**, on produit une transition du signal pour chaque 1, et pas de transition pour les 0.

➤ L'inconvénient de ces codes est qu'ils ne permettent pas la création de transition lors de longues séquences de 0 ou de 1, d'où un risque **de perte de synchronisation**.

Application des codes NRZ et NRZI



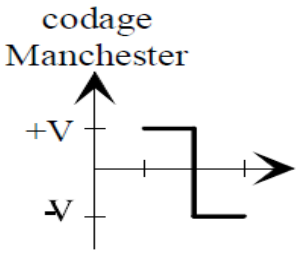
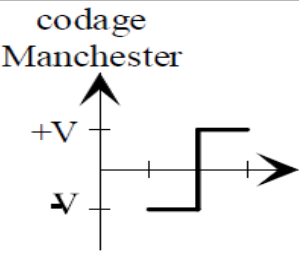
Application des codes NRZ et NRZI



Le code de Manchester

Le **codage de Manchester** consiste en l'introduction :

- d'une transition **négative**, au milieu du bit, lors d'un niveau logique **bas**,
- d'une transition **positive**, au milieu du bit, lors d'un niveau logique **haut**.

Niveau logique	codage Manchester
Niveau bas	
Niveau haut	

➤ Ce code est celui adopté pour les réseaux Ethernet.

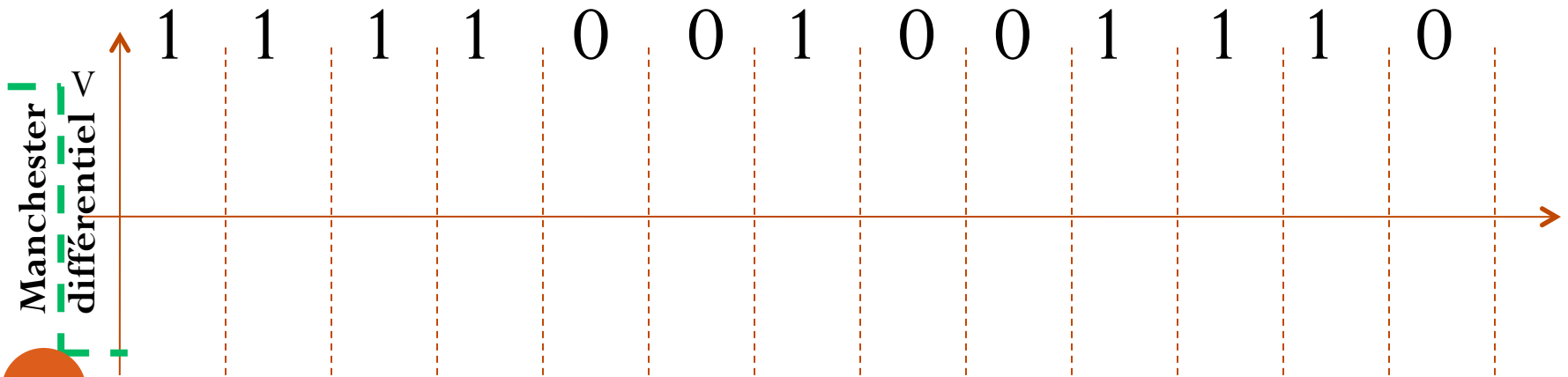
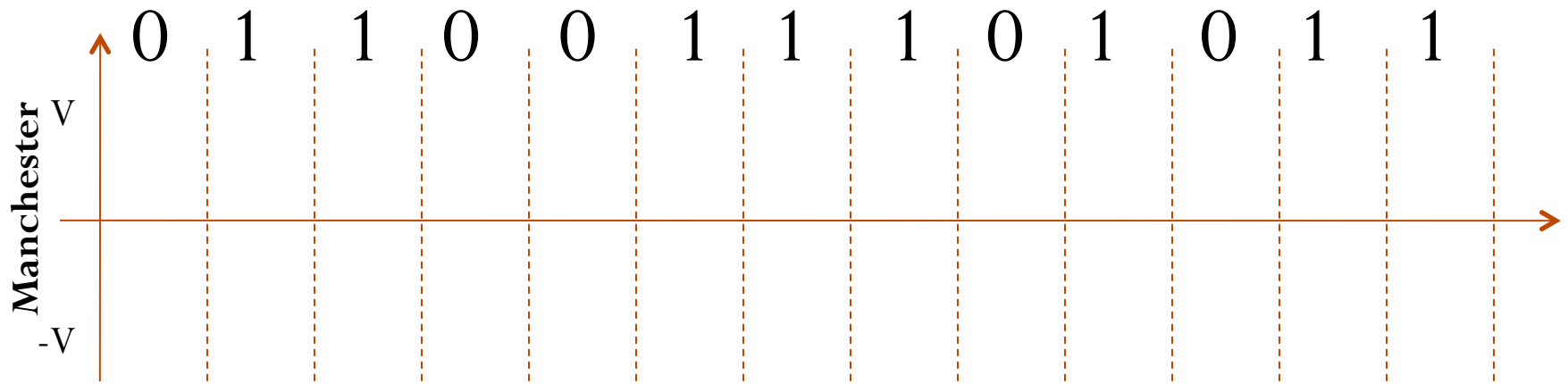
➤ Le codage Manchester tient compte du sens de la transition. **Il faut donc faire attention de ne pas inverser les fils lors de la liaison !**

➤ Solution : Le **codage de Manchester différentiel**.

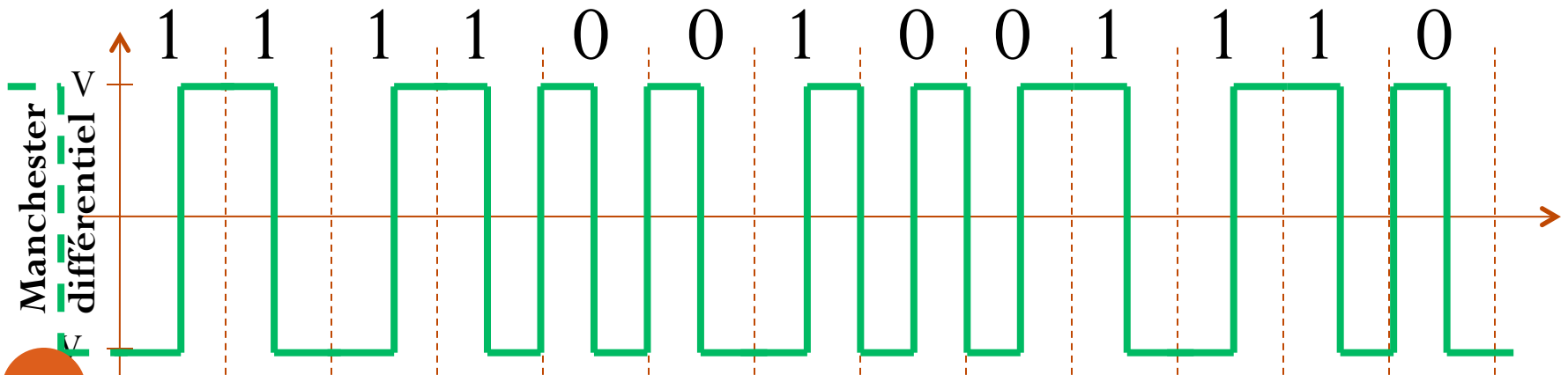
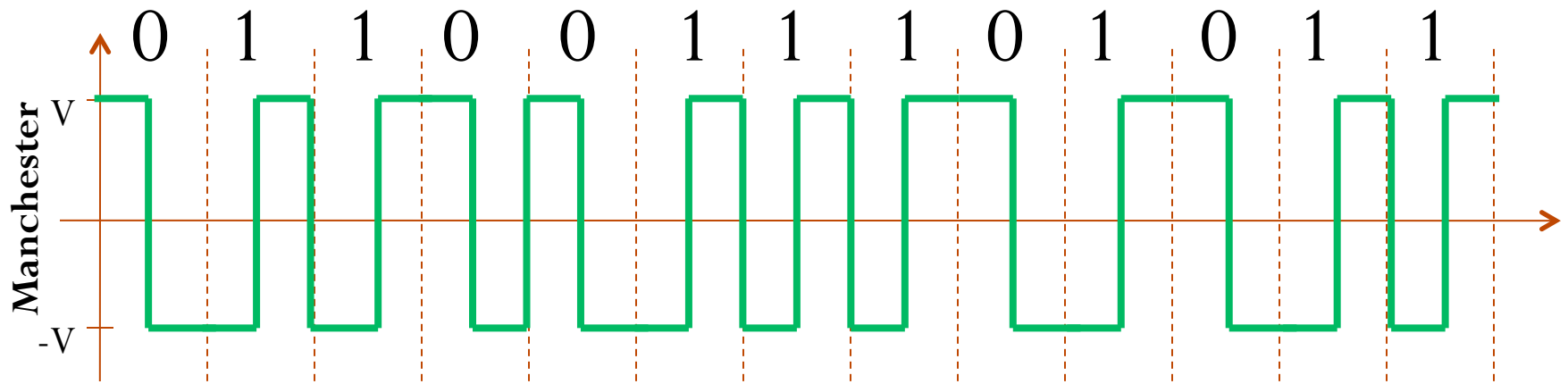
-Transition de même sens que la précédente lors d'un niveau **bas**,

16 Transition de sens opposé à la précédente lors d'un niveau **haut**.

Application des codes de Manchester et Manchester différentiel.



Application des codes de Manchester et Manchester différentiel



Autres codes binaires

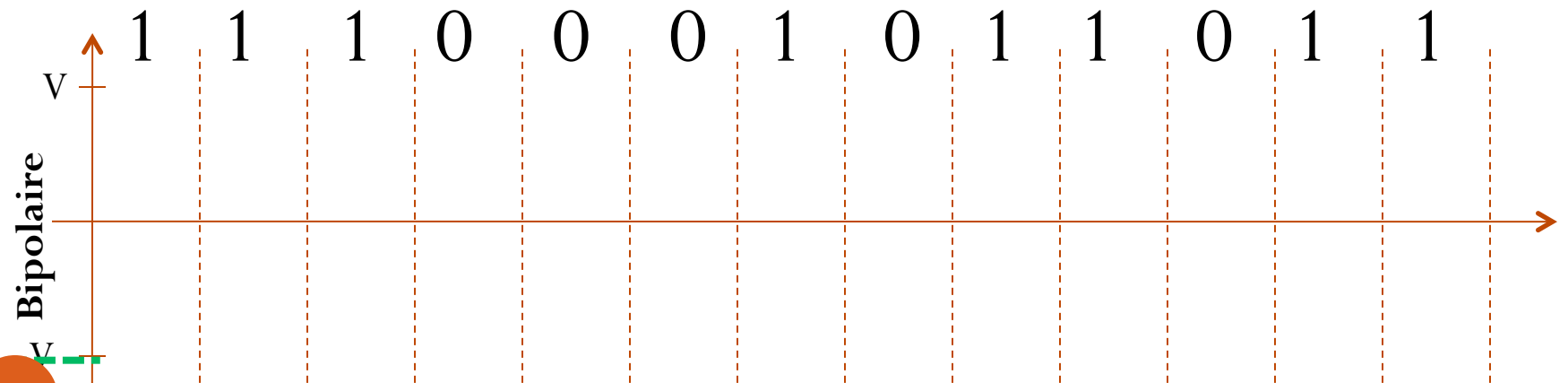
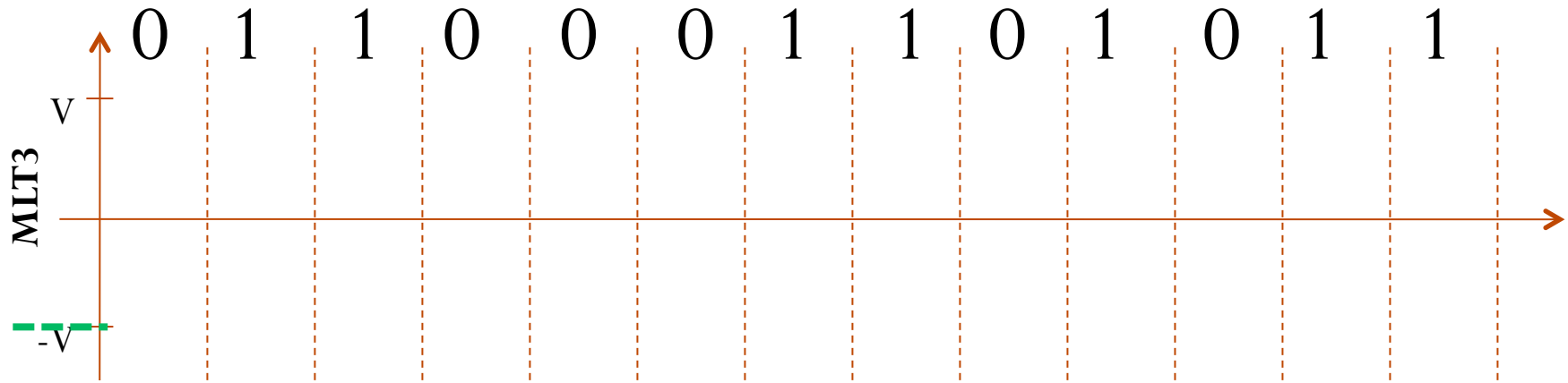
➤ Le **codage MLT3**:

Dans ce codage, seuls les 1 font changer le signal d'état. Les 0 sont codés en conservant la valeur précédemment transmise. Les 1 sont codés successivement sur trois états : $+V$, 0 et $-V$. Le principal avantage du codage MLT3 est de **diminuer fortement la fréquence nécessaire** pour un débit donné grâce à l'utilisation de **3 états**. Les longues séquences de 0 peuvent entraîner une perte ou un déphasage de l'horloge du récepteur.

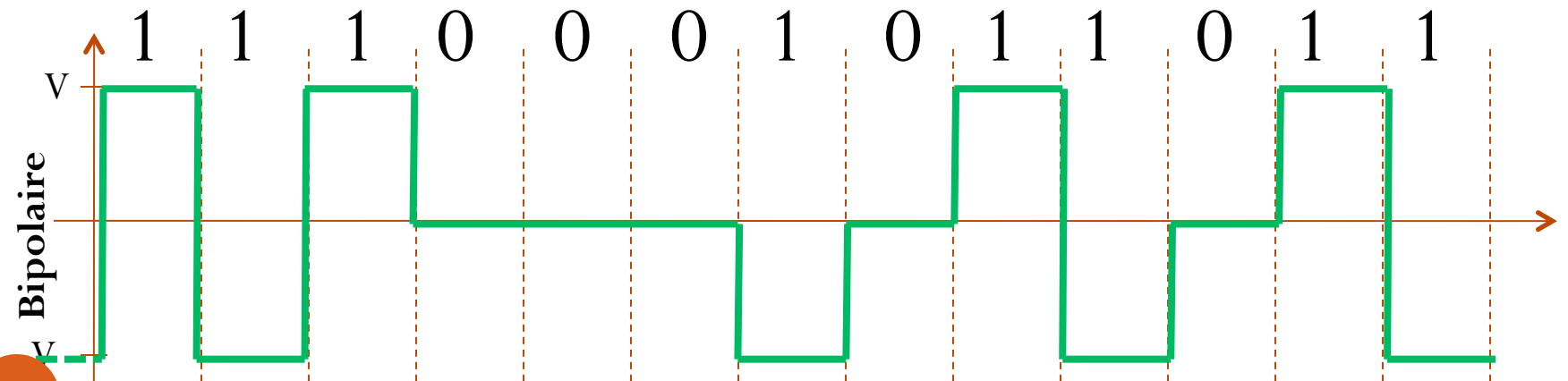
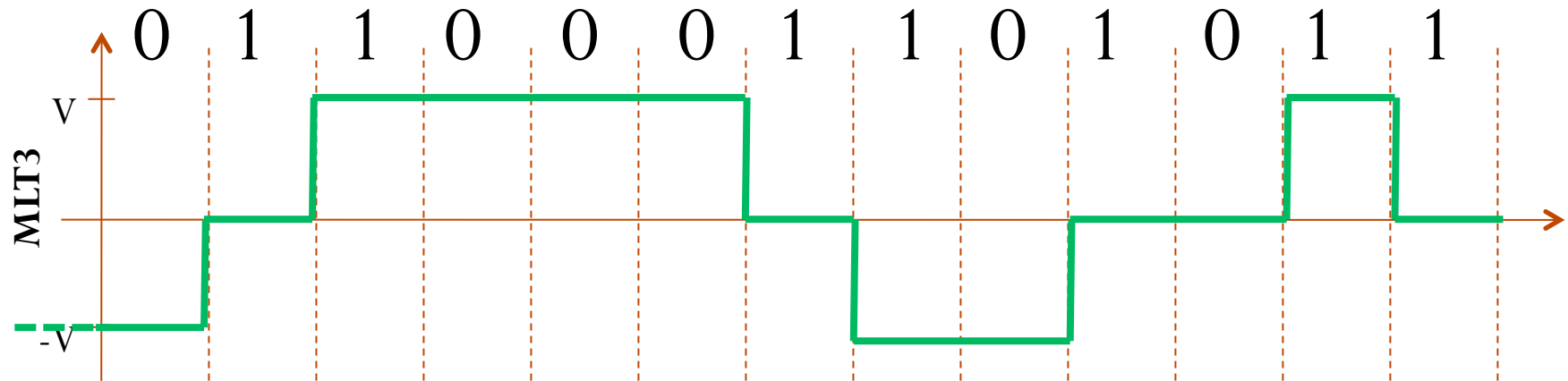
➤ Le **codage bipolaire**:

Il permet d'obtenir une **réduction encore plus importante du spectre** en ne codant qu'**un seul type de bit** (par exemple, les niveaux hauts). Leur polarité est alternée pour éliminer la composante continue. Lors de longues séquences de niveaux bas, il n'y a pas de transition ce qui autorise un risque de perte d'horloge.

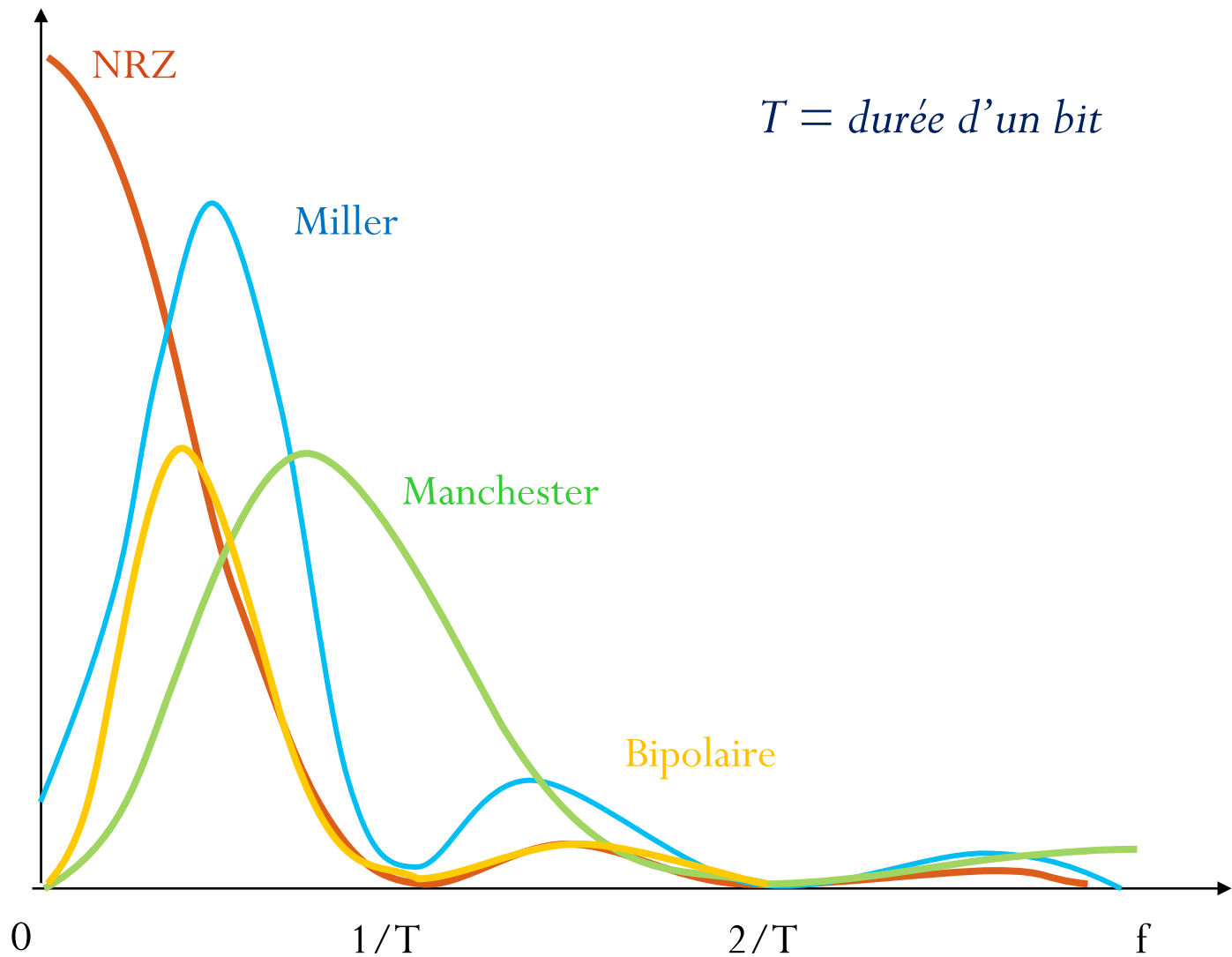
Application des codes MLT3 et binaire



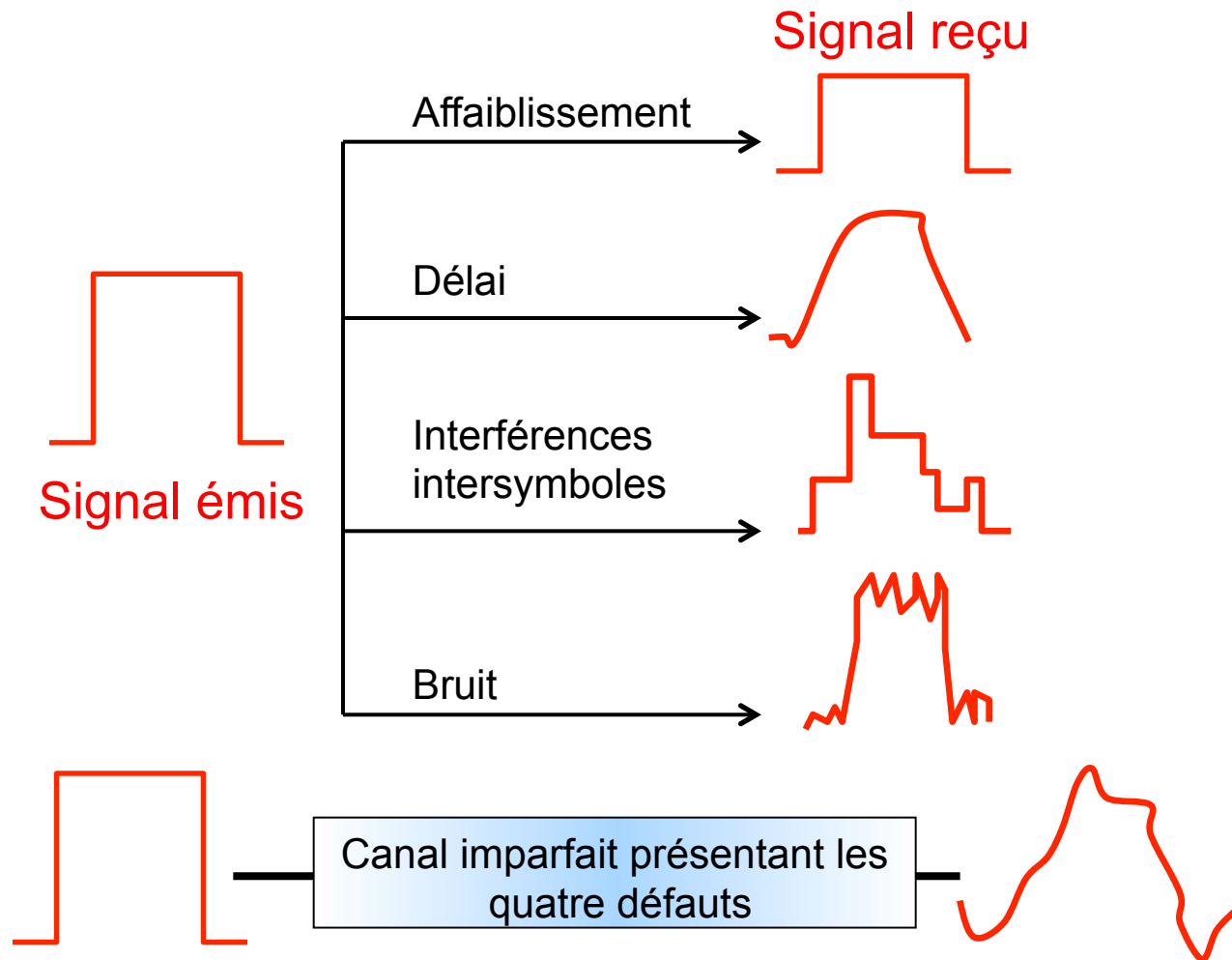
Application des codes MLT3 et binaire.



Comparaison des DSP



Gestion des erreurs



Détection vs correction

- **Détection** : on repère l'existence d'une erreur au moins mais on ne peut pas la localiser

Ex. : code de parité paire $\rightarrow$ bit parité $=0$ si somme totale des bits est paire

- Émis : 00010100

- Reçu : 01010100 $\rightarrow$ erreur détectée mais non localisable

- **Correction** : on repère l'existence de l'erreur et on la localise

Ex. : A = 00111 ; B = 00000 ; C = 11100

- Émis : BAC = 00000 00111 11100

- Reçu : 00100 10111 11100

- Correction : on choisit le mot le plus proche $\rightarrow$ 00000 00111 11100

- **Détection et correction** nécessitent **l'ajout de bits de contrôle**

aux messages utiles

Utilisation des codes détecteurs et correcteurs

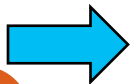
- **Détecteurs** : utilisés dans les systèmes permettant la retransmission des données.
- **Correcteurs** : utilisés dans les systèmes ne permettant pas la retransmission des données
 - Transmission longue : satellites
 - Transmission simplex : TV, radio
 - Enregistrements : CD, DVD
 - Temps réel : téléphonie
- **Principes généraux**
 - La détection d'erreur gaspille moins de ressources que la correction d'erreurs.
 - Plus on veut corriger d'erreurs, plus on gaspille de ressources.
 - Plus on veut corriger d'erreurs, plus l'algorithme est complexe et consomme du temps machine.

Le VRC (Vertical Redundancy Check)

- On va protéger une séquence de bits en ajoutant un nouveau bit de telle sorte que le nombre de bits ayant la valeur 1 soit pair (ou impair) = **Code à parité**.
- Un code étant défini sur n bits, on utilise le n+1ème bit pour introduire le code vérificateur.

Exemple : Transmission de « IUT » en ASCII-VRC.

Lettre	ASCII	VRC pair	VRC impair
I	1001001		
U	1010101		
T	1010100		



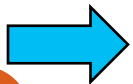
Message transmis :
(VRC pair)

Le VRC (Vertical Redundancy Check)

- On va protéger une séquence de bits en ajoutant un nouveau bit de telle sorte que le nombre de bits ayant la valeur 1 soit pair (ou impair) = **Code à parité**.
- Un code étant défini sur n bits, on utilise le n+1ème bit pour introduire le code vérificateur.

Exemple : Transmission de « IUT » en ASCII-VRC.

Lettre	ASCII	VRC pair	VRC impair
I	1001001	1 1001001	0 1001001
U	1010101	0 1010101	1 1010101
T	1010100	1 1010100	0 1010100



Message transmis :
(VRC pair)

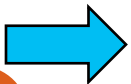
1 1001001 0 1010101 1 1010100

Le LRC (Longitudinal Redundancy Check)

➤ Principe similaire à celui du VRC, mais au lieu de protéger les caractères un par un, on protège l'ensemble des bits de même rang de tous les caractères.

Exemple : Transmission de « IUT » en ASCII-LRC.

I	1001001
U	1010101
T	1010100
LRC pair	
LRC impair	



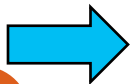
Message transmis :
(LRC pair)

Le LRC (Longitudinal Redundancy Check)

➤ Principe similaire à celui du VRC, mais au lieu de protéger les caractères un par un, on protège l'ensemble des bits de même rang de tous les caractères.

Exemple : Transmission de « IUT » en ASCII-LRC.

I	1001001
U	1010101
T	1010100
LRC pair	1001000
LRC impair	0110111



Message transmis :
(LRC pair)

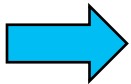
1001000 1001001 1010101
1010100

Le LRC + VRC

➤ On protège chaque caractère par un code VRC et l'ensemble des bits par un code LRC. La parité des LRC et VRC est la même.

Exemple : Transmission de « IUT » en ASCII-LRC+VRC.

		VRC pair	VRC impair
I	1001001		
U	1010101		
T	1010100		
LRC			



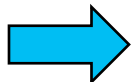
Message transmis :
(LRC+VRC pair)

Le LRC + VRC

➤ On protège chaque caractère par un code VRC et l'ensemble des bits par un code LRC. La parité des LRC et VRC est la même.

Exemple : Transmission de « IUT » en ASCII-LRC+VRC.

		VRC pair	VRC impair
I	1001001	1 1001001	0 1001001
U	1010101	0 1010101	1 1010101
T	1010100	1 1010100	0 1010100
LRC		01001000	00110111



Message transmis :
(LRC+VRC pair)

01001000 11001001 01010101
11010100

Le CRC (Code à Redondance Cyclique)

- Utilisé notamment dans la trame Ethernet
- **Principe** : ajoute des bits qui sont des **combinaisons linéaires** des bits du message utile
- **A l'émission** : Transformation du message $M = b_1 b_2 \dots b_k$ en un polynôme
$$m(x) = b_1 x^{k-1} + b_2 x^{k-2} + \dots b_{k-1} x + b_k ;$$
Division de $x^r m(x)$ par le **polynôme générateur** G de degré r : $x^r m(x) = Q(x) \cdot G(x) + R(x)$
 Q = polynôme quotient
 R = polynôme reste de la division = **CRC**
On transmet M suivi du CRC.

Ex. : Avec $G(x) = x^4 + x + 1$, le message 011011 est transmis accompagné du CRC = ?

- **A la réception** : division du polynôme correspondant à la suite totale de bits reçus (information + CRC) par $G(x)$
Si reste $\neq 0$, une erreur s'est produite dans la transmission : retransmission
Si non on est **à peu près sûr** que la transmission s'est faite sans erreur

Calcul du CRC

$$G(x) = x^4 + x + 1 \text{ et } M = 011011$$

$$\rightarrow m(x) = 0x^5 + 1x^4 + 1x^3 + 0x^2 + 1x + 1$$

$$\begin{aligned} \rightarrow r = 4 \text{ et } x^4 m(x) &= 0x^9 + 1x^8 + 1x^7 + 0x^6 + 1x^5 + 1x^4 \\ &= x^8 + x^7 + x^5 + x^4 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{r} x^8 + x^7 + x^5 + x^4 \\ - (x^8 + x^5 + x^4) \\ \hline x^7 \\ - (x^7 + x^4 + x^3) \\ \hline x^4 + x^3 \\ - (x^4 + x + 1) \\ \hline x^3 + x + 1 \end{array}$$

$$x^4 + x + 1$$

$$x^4 + x^3 + 1$$

$$\rightarrow \text{CRC} = 1011$$

$$\rightarrow \text{On transmet } 011011\mathbf{1011}$$

Propriétés des codes correcteurs d'erreurs

➤ Définitions

- La **distance** entre deux séquences binaires de même taille est égale au nombre de bits de rang identique par lesquels elles diffèrent.

Exemple : $d(1100110, 1010110) = ?$

- Soit un code composé de N mots valides. La **distance de Hamming** de ce code est définie comme la distance minimale qui sépare deux mots valides du code.

Exemple : le code $C = [000000, 001110, 010101, 011011, 100011, 101101]$ a une distance de Hamming $d_H = ?$

- **Propriété** : Un code de distance de Hamming d_H détecte $(d_H - 1)$ erreurs et corrige k erreurs où $d_H = 2k + 1$

Détection de l'erreur = le mot reçu n'appartient pas au code

Correction de l'erreur = le mot le plus proche du mot reçu est choisi

Propriétés des codes correcteurs d'erreurs

➤ Définitions

- La **distance** entre deux séquences binaires de même taille est égale au nombre de bits de rang identique par lesquels elles diffèrent.

Exemple : $d(1\mathbf{100110}, 1\mathbf{010110}) = 2$

- Soit un code composé de N mot valides. La **distance de Hamming** de ce code est définie comme la distance minimale qui sépare deux mots valides du code.

Exemple : le code $C = [000000, 001110, 010101, 011011, 100011, 101101]$ a une distance de Hamming $d_H = 3$

- ## ➤ Propriété
- : Un code de distance de Hamming d_H détecte $(d_H - 1)$ erreurs et corrige k erreurs où $d_H = 2k + 1$

Détection de l'erreur = le mot reçu n'appartient pas au code

Correction de l'erreur = le mot le plus proche du mot reçu est choisi

Exemple de code correcteur d'erreur

$$C = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6] = [000000, 001110, 010101, 011011, 100011, 101101]$$

$d_H = ? \rightarrow$ détecte ? erreurs et peut en corriger ?

Exemple 1 : émission de c_1 , réception de $c'_1 = 0100000$

$\rightarrow$

Exemple 2 : émission de c_1 , réception de $c'_1 = 001001$

$\rightarrow$

Exemple 3 : émission de c_1 , réception de $c'_1 = 100011$

Exemple de code correcteur d'erreur

$$C = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6] = [000000, 001110, 010101, 011011, 100011, 101101]$$

$d_H = 3 \rightarrow$ détecte 2 erreurs et peut en corriger 1

- *Exemple 1* : émission de c_1 , réception de $c'_1 = 0100000$
 $\rightarrow$ **Erreur = 1**

Le récepteur corrige le mot reçu par c_1 car c' est le mot le plus proche de c'_1 .

- *Exemple 2* : émission de c_1 , réception de $c'_1 = 001001$
 $\rightarrow$ **Erreur = 2**

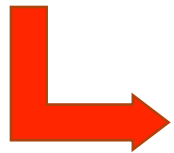
Plusieurs mots du code sont à même distance de c'_1 : le récepteur ne peut pas corriger les erreurs. Par contre, c'_1 n'appartient pas au code, donc il détecte l'erreur.

- *Exemple 3* : émission de c_1 , réception de $c'_1 = 100011$
 $\rightarrow$ **Erreur = 3**

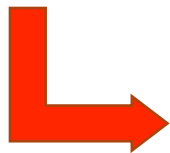
Le récepteur ne détecte pas l'erreur : il croit recevoir c_5 .

Limites de la transmission bande de base

- Bande passante du support de transmission
- Distance de transmission



Dégradation du signal transmis



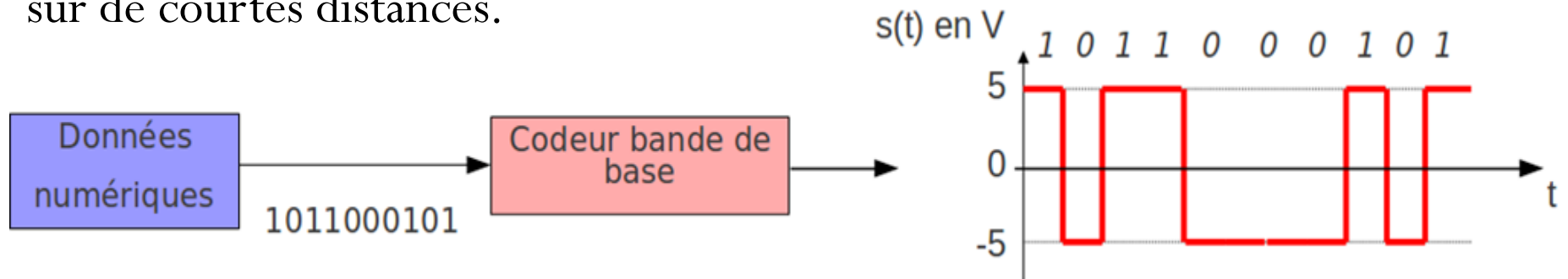
Transmission en bande transposée

Transmission des signaux en bande transposée

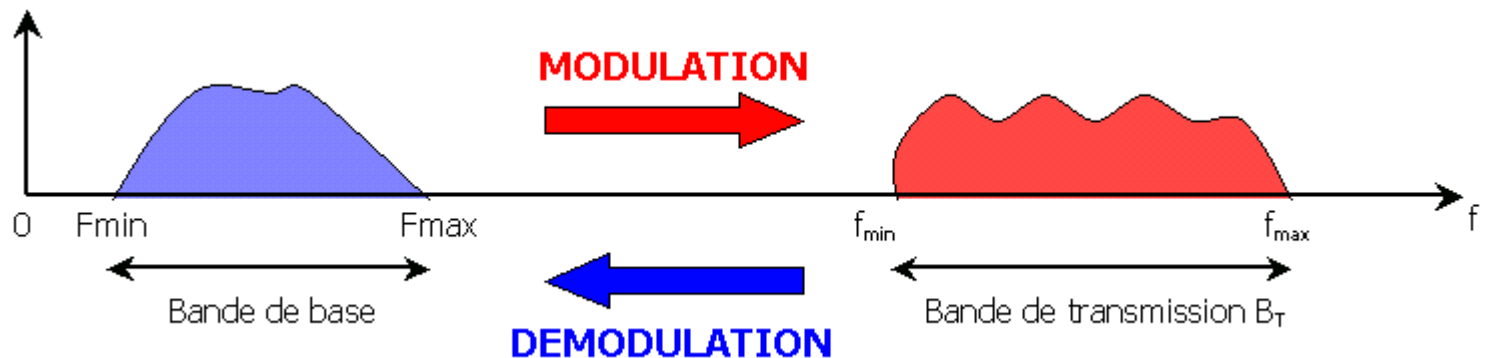
- ◆ Le principe
- ◆ La modulation d'amplitude
- ◆ La modulation de phase
- ◆ La modulation d'amplitude et phase
- ◆ La modulation de fréquence

Rappel : Transmission bande de base / bande transposée

Bande de base : les bits sont transformés en niveaux physiques par un code en ligne puis le signal est transmis tel quel sur le support → transmission sur de courtes distances.

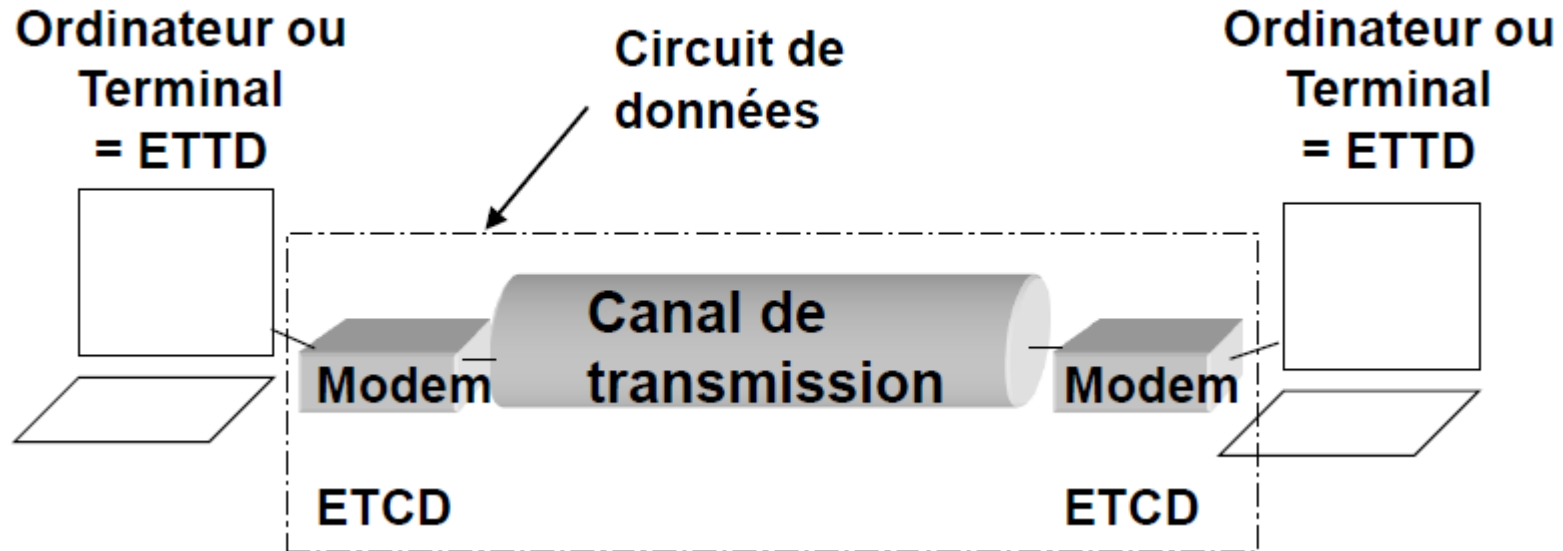


Bande transposée : après codage, le spectre du signal est transposé en fréquence (opération de modulation) → transmission sur de longues distances.



Transmission en bande transposée

Le signal transmis est analogique : adapté aux longues distances



Modem = Modulateur / Démodulateur

ETCD = Equipement Terminal de Circuit de Données

Exemple : canal de transmission = ligne téléphonique

Le principe : La modulation

➤ Deux signaux initiaux :

- 1) **Signal modulant** : séquence binaire notée $m(t)$
- 2) **Signal porteur** ou **porteuse** : $p(t) = A_p \sin(2\pi f_p t + \varphi_p)$
où f est la fréquence porteuse.

➤ **Moduler** : changer 1 ou 2 des caractéristiques de la porteuse $p(t)$ « sur les ordres » de $m(t)$.

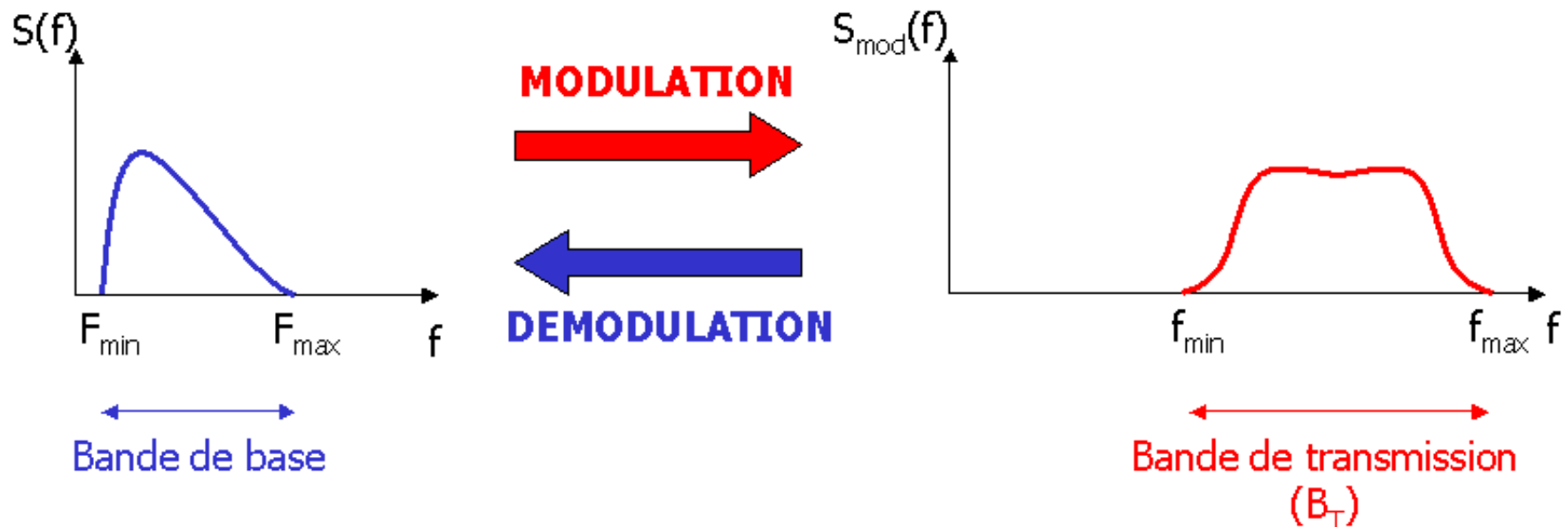
- Faire varier l'amplitude : **modulation d'amplitude**
- Faire varier la phase : **modulation de phase**
- Faire varier l'amplitude et la phase: **modulation d'amplitude et phase**
- Faire varier la fréquence: **modulation de fréquence**

➤ **Signal modulé** : Signal obtenu $s_{\text{mod}}(t)$ après modulation et utilisé pour la transmission.

➤ **Démoduler** : reconstituer le signal modulant $m(t)$ à partir du signal modulé reçu $s_{\text{mod}}(t)$ et de la porteuse $p(t)$.

Effet sur les spectres

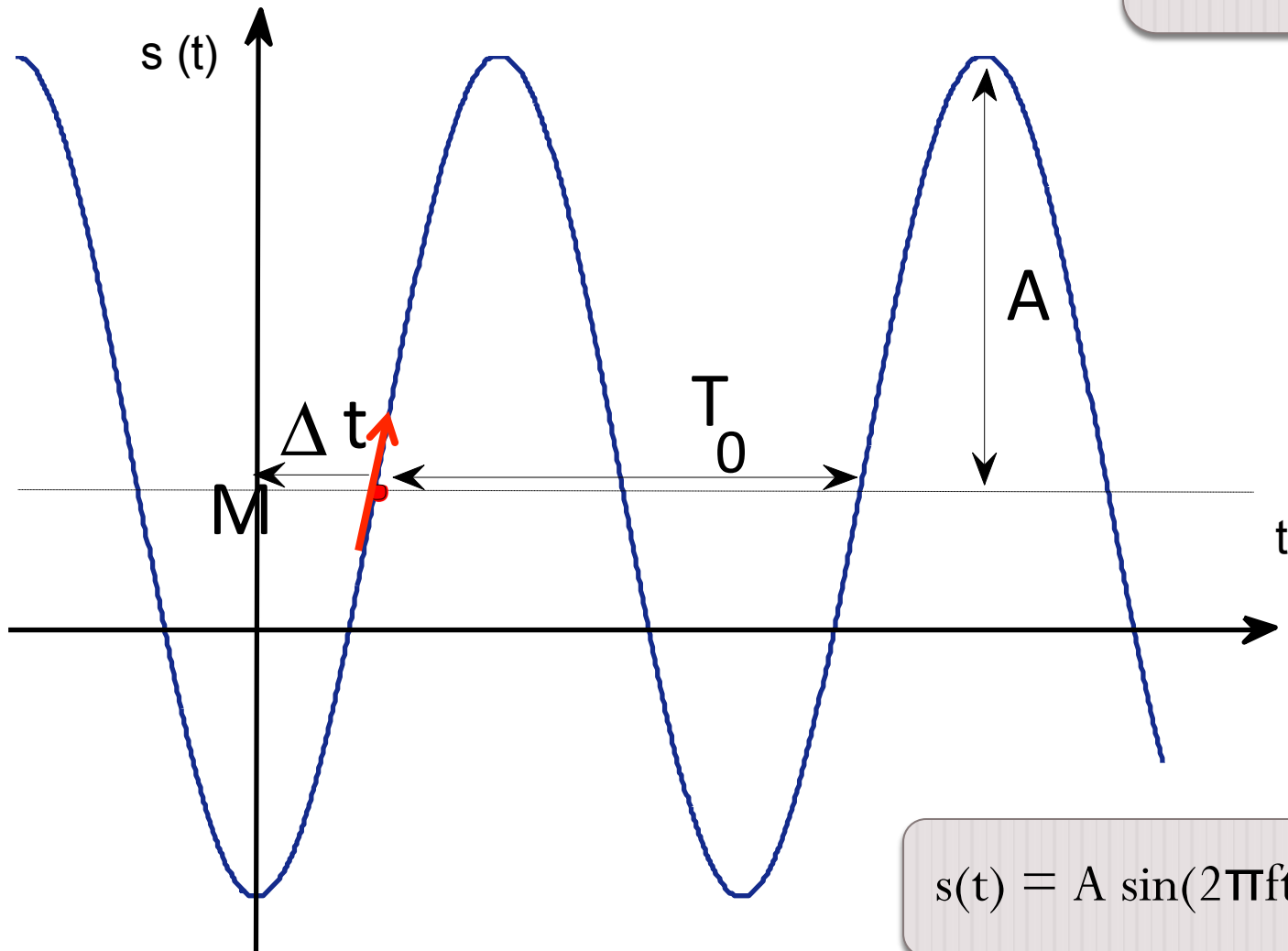
- La modulation est une **opération spectrale**. Elle modifie les caractéristiques du spectre du signal $m(t)$.



- On peut moduler un signal analogique ou numérique.
Dans ce cours, étude des modulations numériques.

Rappel : Signal sinusoïdal

$$\varphi = \pm \frac{2\pi\Delta t}{T_0}$$

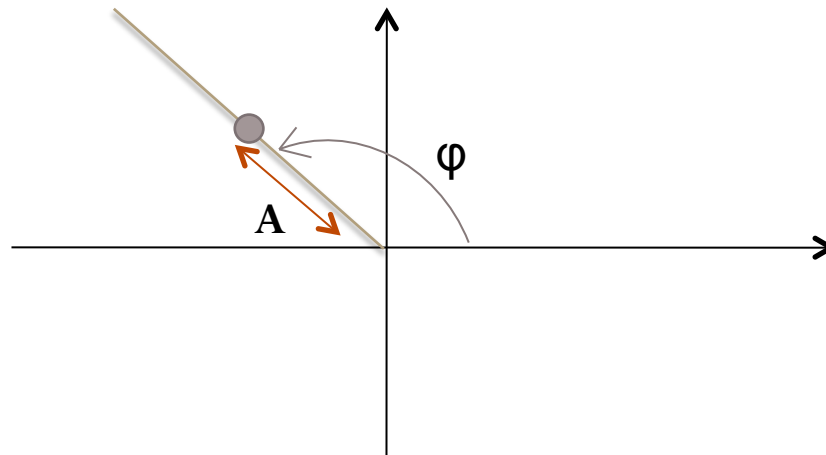


La constellation

Constellation : représentation trigonométrique pour les modulations d'amplitude, de phase et d'amplitude et de phase.

➤ Chaque état (symbole) de la porteuse (amplitude/phase) est représenté par un point :

- dont la **distance au centre du repère** est égale à **l'amplitude de la porteuse A**
- qui forme un **angle avec l'axe des abscisses** égal à la **phase de la porteuse φ**



Propriété des modulations

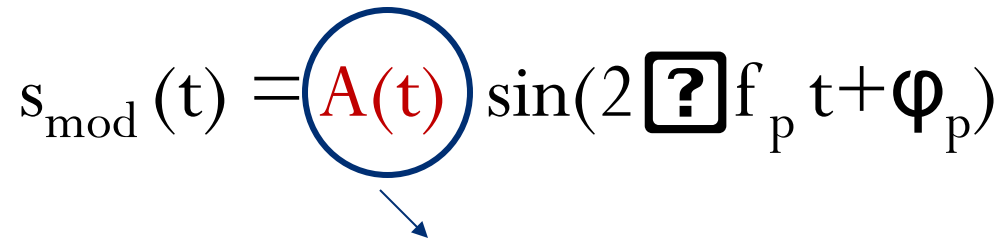
- **La rapidité de modulation R** (en bauds) est le nombre de symboles par seconde
- **La valence V** de la modulation correspond au nombre de symboles différents.
- **Le débit binaire D** est égal à $D = R \log_2(V)$

- Une modulation performante minimise :
 - L'occupation spectrale (ou largeur de bande de transmission)
 - Le taux d'erreur binaire

- En règle générale,
 - Plus les points de la constellation sont éloignés de l'origine, plus la transmission consomme de puissance.
 - Plus une modulation comporte d'états, plus son efficacité spectrale est élevée.
 - Mais plus une modulation comporte d'états, plus elle est sensible au bruit.

La modulation d'amplitude

- La modulation d'amplitude consiste à **faire varier l'amplitude** de la porteuse selon le signal utile $m(t)$.

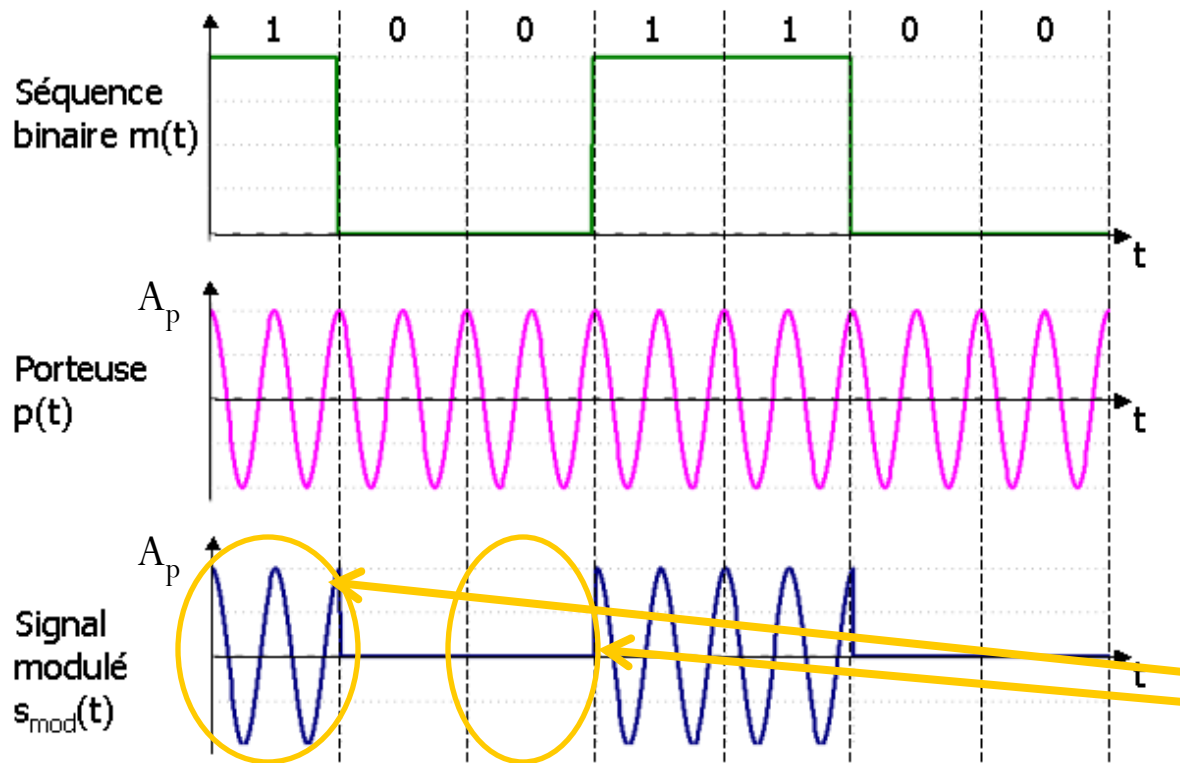
$$s_{\text{mod}}(t) = \textcircled{A(t)} \sin(2 \boxed{?} f_p t + \varphi_p)$$


Amplitude variant selon le
message à transmettre, $m(t)$

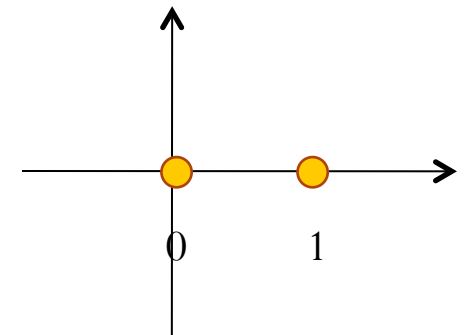
- Deux types de modulations d'amplitude numériques :
ASK (ou MDA) et OOK.

La modulation OOK (On Off Keying)

- Amplitude $A(t) = 0$ pour transmettre un bit à « 0 »
- Amplitude $A(t) = A_p$ pour transmettre un bit à « 1 »



Constellation :

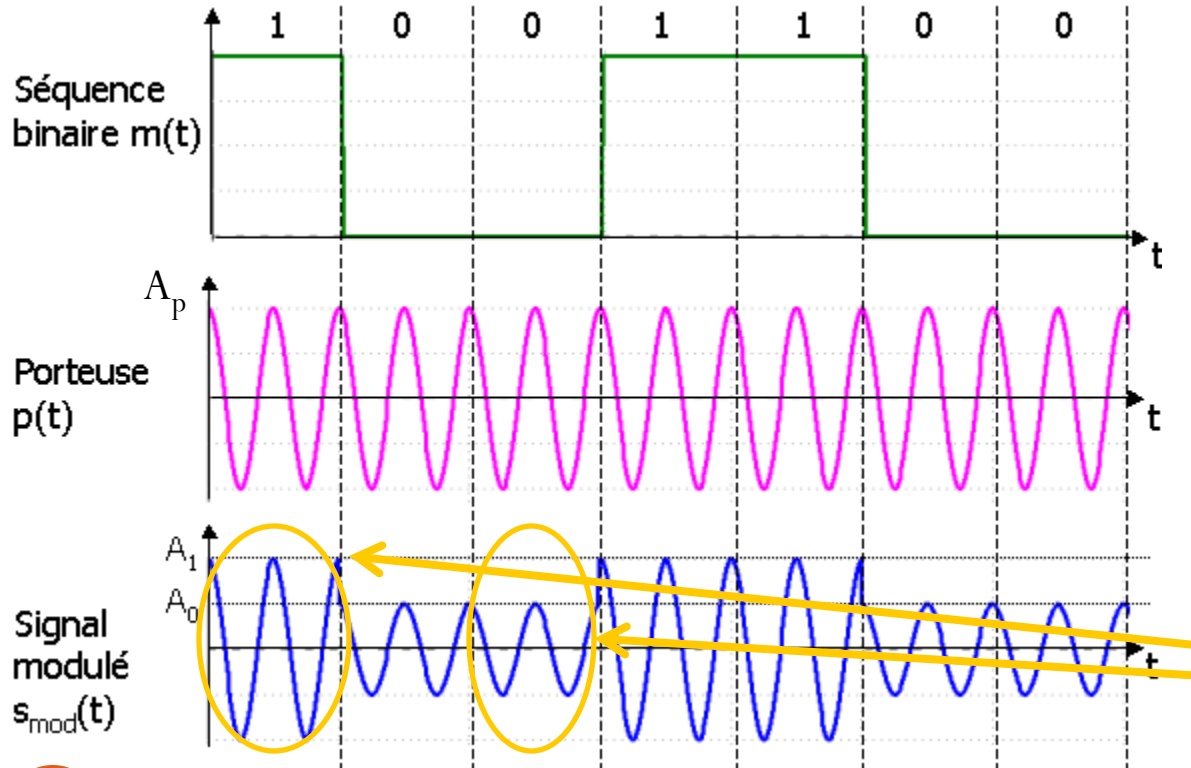


2 états de modulation
ou 2 symboles différents

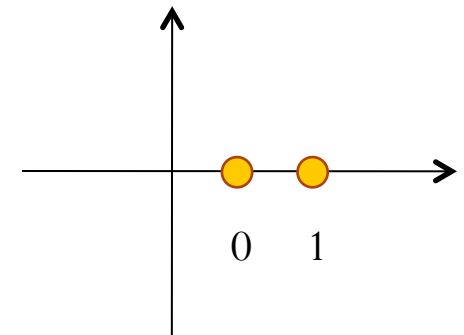
La modulation 2-ASK (Amplitude Shift Keying)

Aussi appelée MDA-2 (Modulation par Déplacement d'Amplitude)

- Amplitude $A(t) = A_0 = A_p/2$ pour transmettre un bit à « 0 »
- Amplitude $A(t) = A_1 = A_p$ pour transmettre un bit à « 1 »



Constellation :

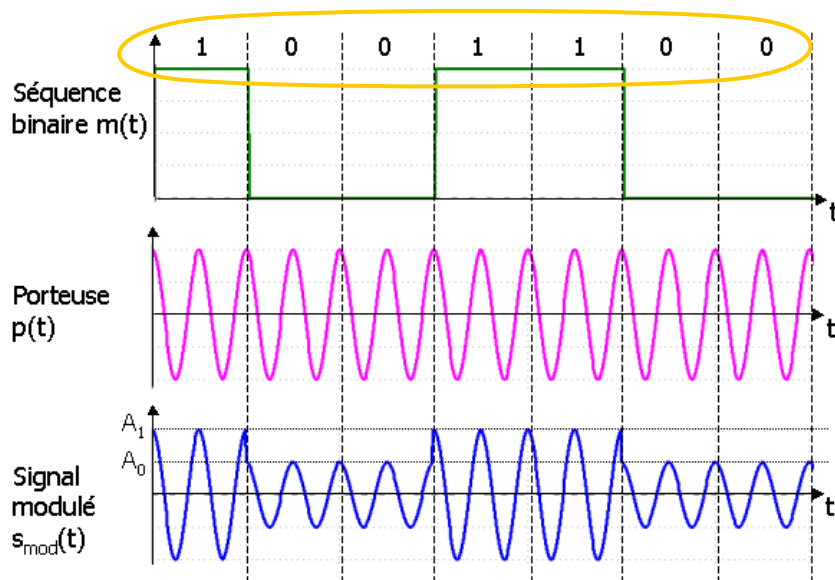


2 états de modulation
ou 2 symboles différents

La modulation 4-ASK (ou MDA-4)

Idée : un symbole ? plusieurs bits

Objectif : augmenter le débit sans augmenter beaucoup la BP

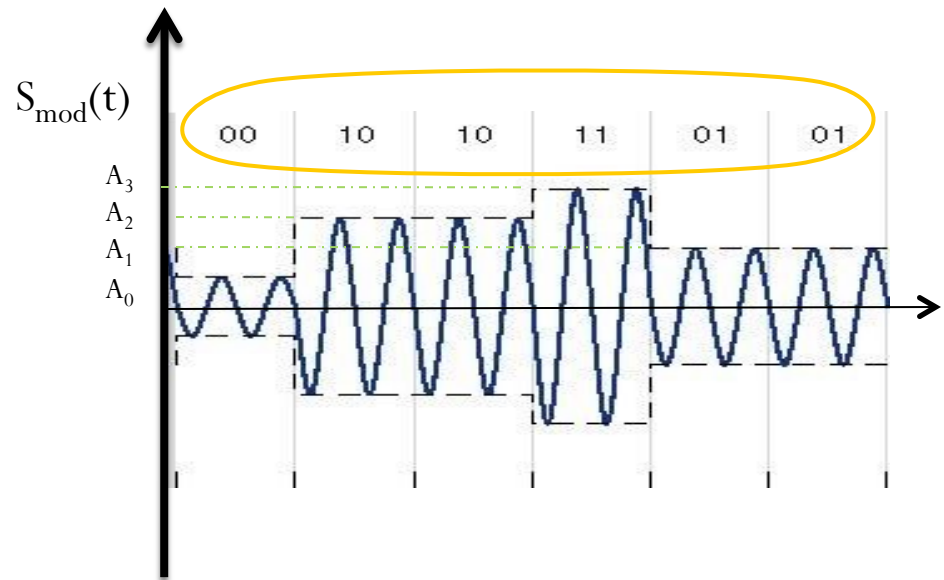


Débit de symbole: R (en baud)

Débit binaire (en bit/s)

$$D = R$$

2-ASK



$D=2R \rightarrow$ 2 fois + de bits émis, donc débit + grand

4 états de modulation sont nécessaires $\rightarrow$ MDA-4

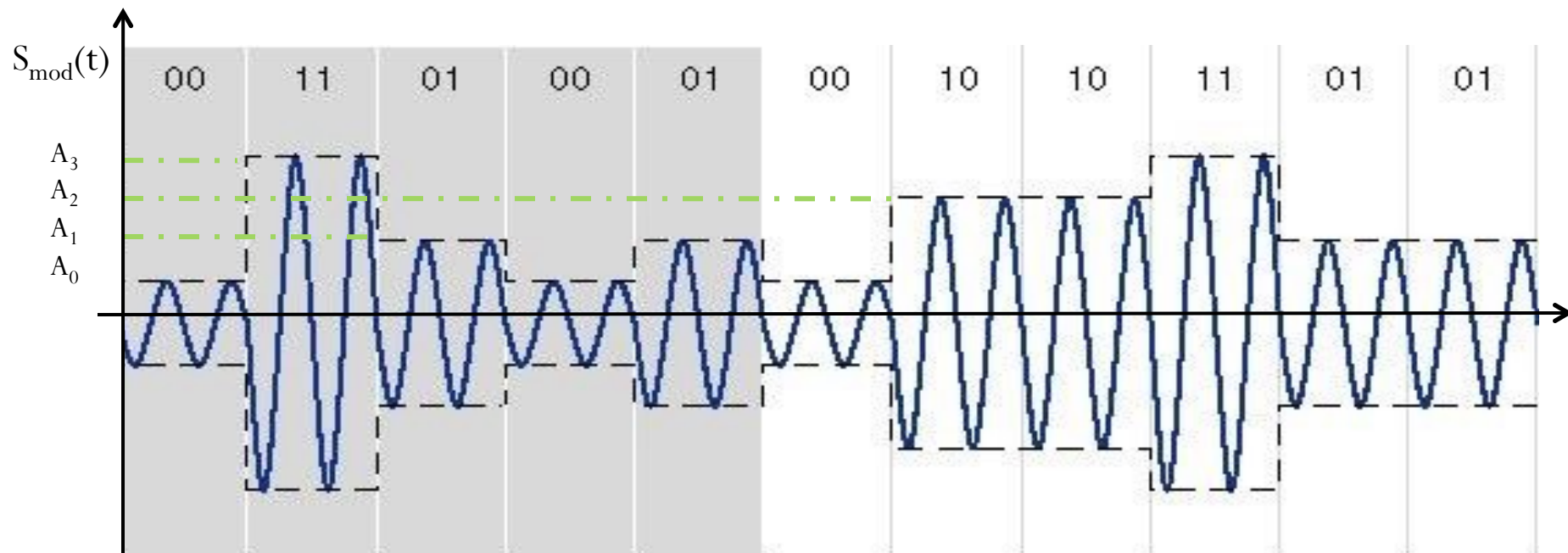
Donc 4 valeurs d'amplitude différentes

4-ASK

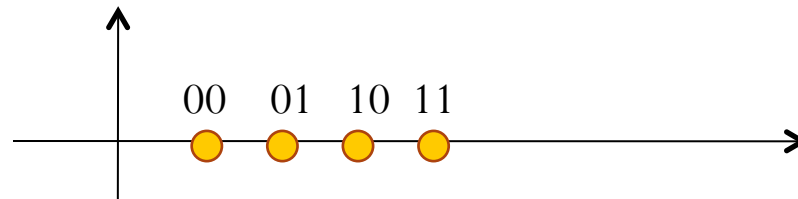
La modulation 4-ASK (ou MDA-4)

4 symboles différents :

- donc 4 groupes binaires différents
- donc 2 bits par groupe

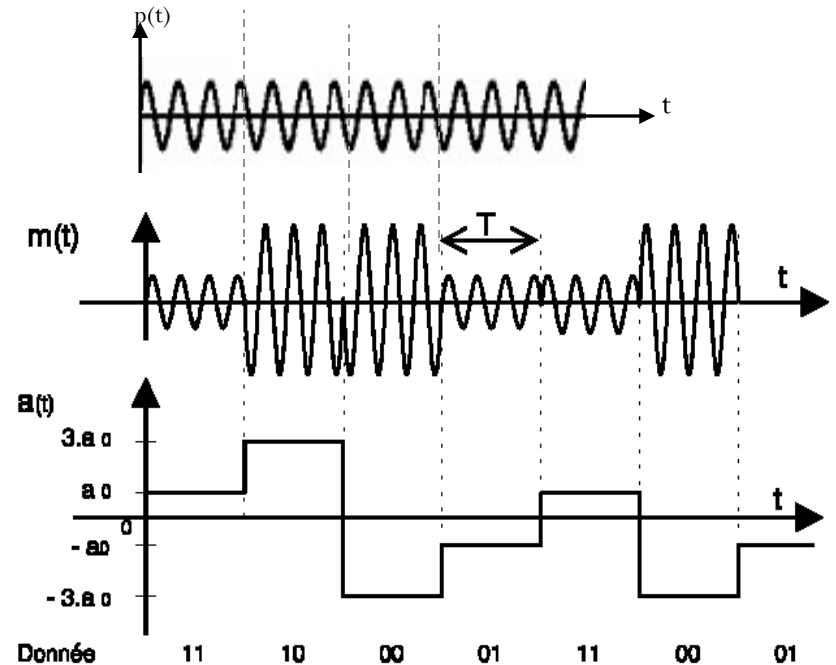
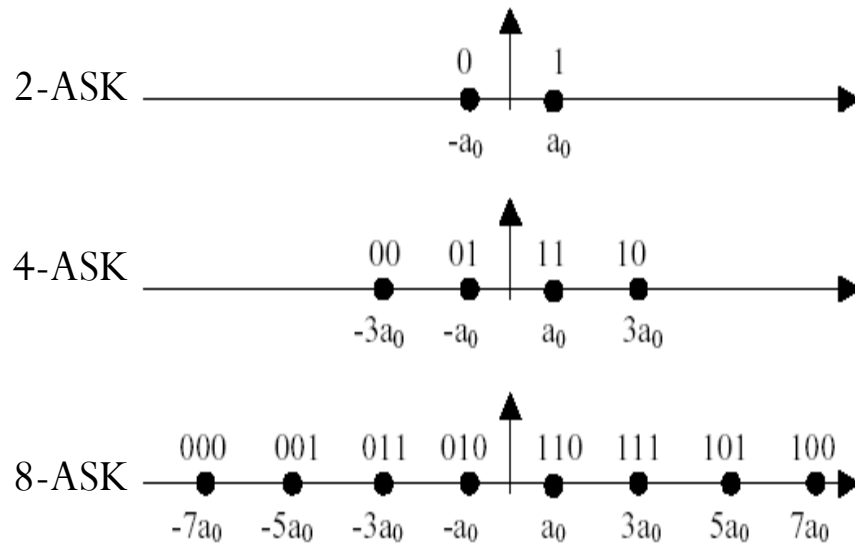


Constellation :



M-ASK à constellations symétriques

- Économiser l'énergie.
- « amplitude négative » ou déphasage de $\boxed{?}$.



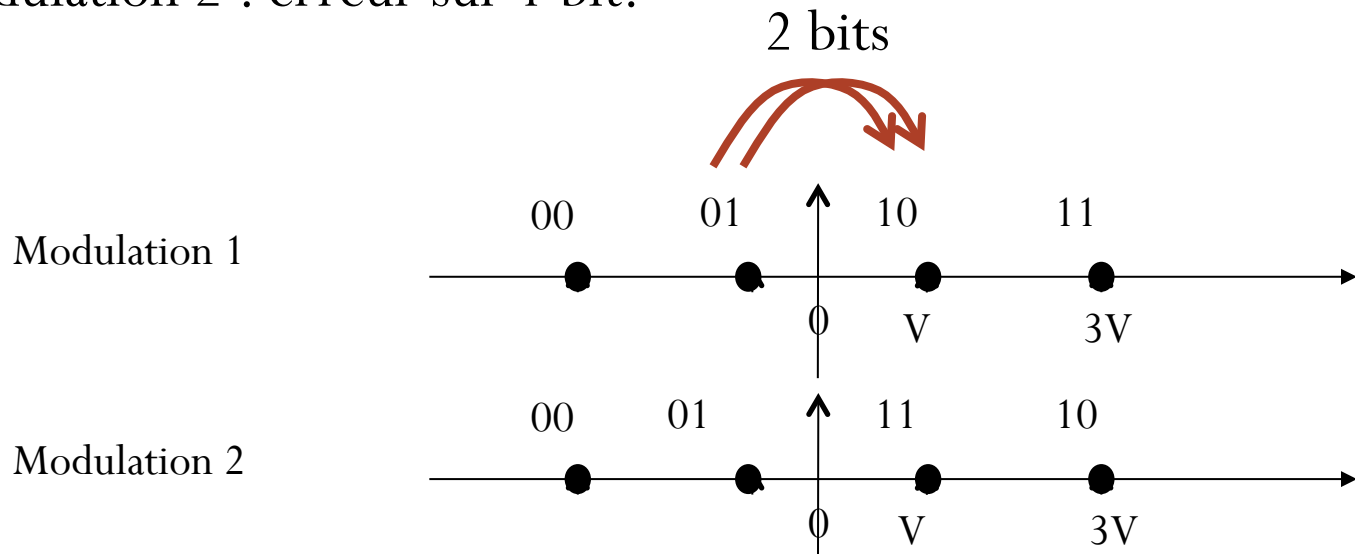
Organisation des constellations

Principe : une erreur de lecture d'un symbole entraîne une erreur sur 1 bit uniquement (alors la probabilité d'erreur est minimale).

Exemple : Le décodeur lit $+V$ au lieu de $-V$.

Modulation 1 : erreur sur 2 bits.

Modulation 2 : erreur sur 1 bit.



Performance d'une modulation

Dans le domaine des télécommunications, on utilise les deux paramètres suivants.

- 1) La courbe de probabilité d'erreur minimale
- 2) L'efficacité spectrale

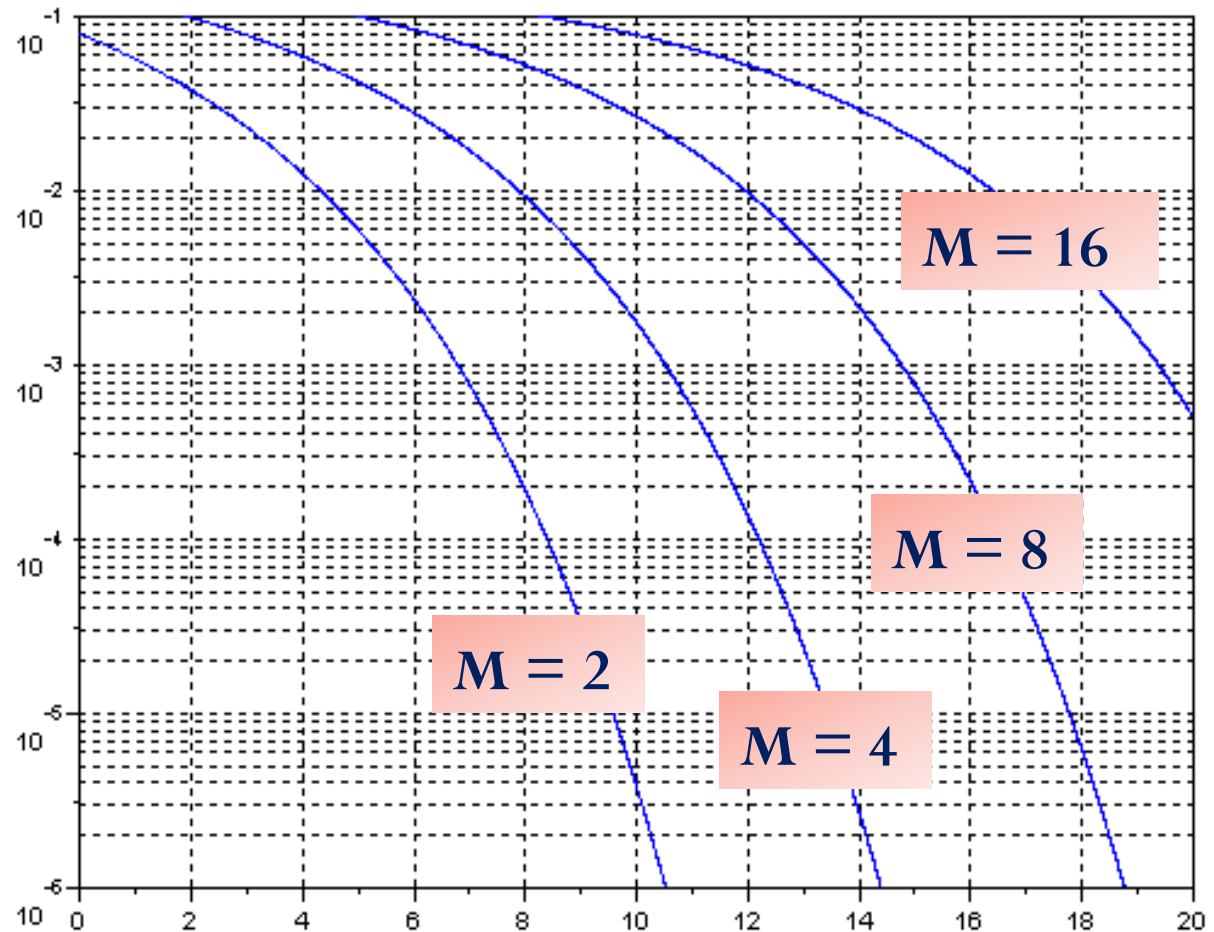
Probabilité d'erreur minimale par bit des MDA-M

$P_{b\min}(e)$

$$RSB_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(RSB)$$

Puissance nécessaire au transport d'un bit /
Puissance du bruit lors de
cette transmission

Notations: E_b/N_0 , ou bien
SNR ou bien RSB



➤ On trace la probabilité d'erreur minimale par bit $P_{b\min}(e)$
en fonction du rapport signal sur bruit par bit RSB_{dB}

RSB_{dB}

Efficacité spectrale des MDA-M

➤ **Efficacité spectrale :** $\eta = \frac{D}{B_T} \propto \log_2(M)$

- D=débit binaire
- B_T=largeur de bande (largeur du spectre du signal modulé)
- Unité: bit.s⁻¹.Hz⁻¹

➤ **Quand on augmente M :**

- 😊 l'efficacité spectrale augmente
- 😞 mais la probabilité d'erreur aussi...

Bilan sur les modulations d'amplitude

- 😊 Bande de transmission étroite
- 😊 Circuits modulateurs et démodulateurs simples
- 😞 Peu résistante au bruit

Application : transmission sur fibre optique par OOK

La modulation M-ASK est peu utilisée pour $M > 2$ car elle n'est pas assez résistante au bruit, en comparaison aux autres modulations existantes.

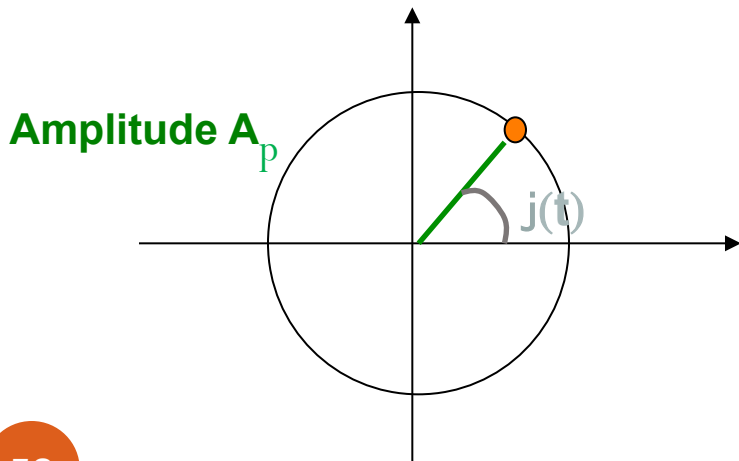
La modulation de phase

Modulation de phase (PSK, *Phase Shift Keying* ou MDP, *Modulation par déplacement de phase*)

➤ déphasage par rapport à une référence (phase de la porteuse).

$$s_{\text{mod}}(t) = A_p \sin(2\pi f_p t + \boxed{?}_p + \boxed{?}(t))$$

↓
Déphasage



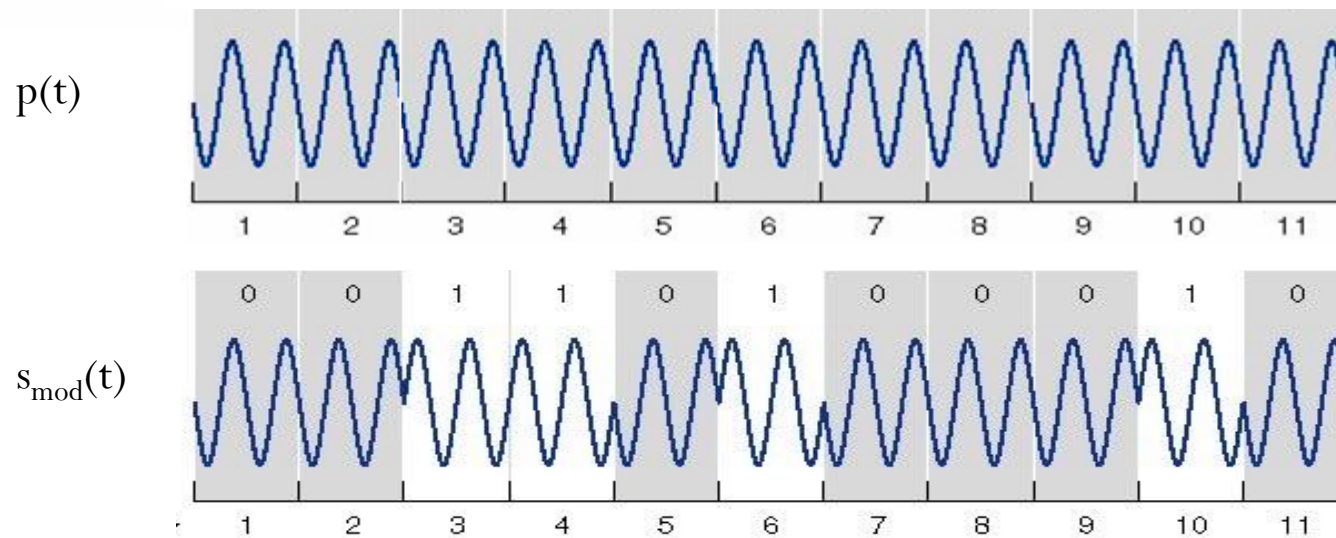
Avec $\boxed{?}(t) = \boxed{?}_1$ ou $\boxed{?}_2$ ou ... ou $\boxed{?}_M$
suivant la valeur du message $m(t)$ à coder.

Exemple : BPSK

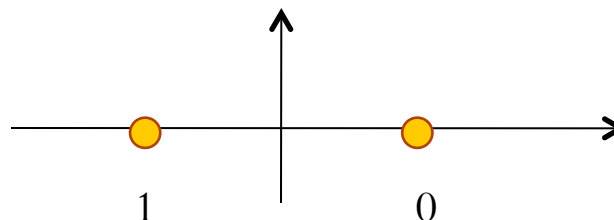
PSK à 2 états, dite BPSK (*Binary* PSK)

0 → en phase avec la porteuse donc $\phi(t)=0$

1 → déphasage de π par rapport à la porteuse donc $\phi(t)=\pi$

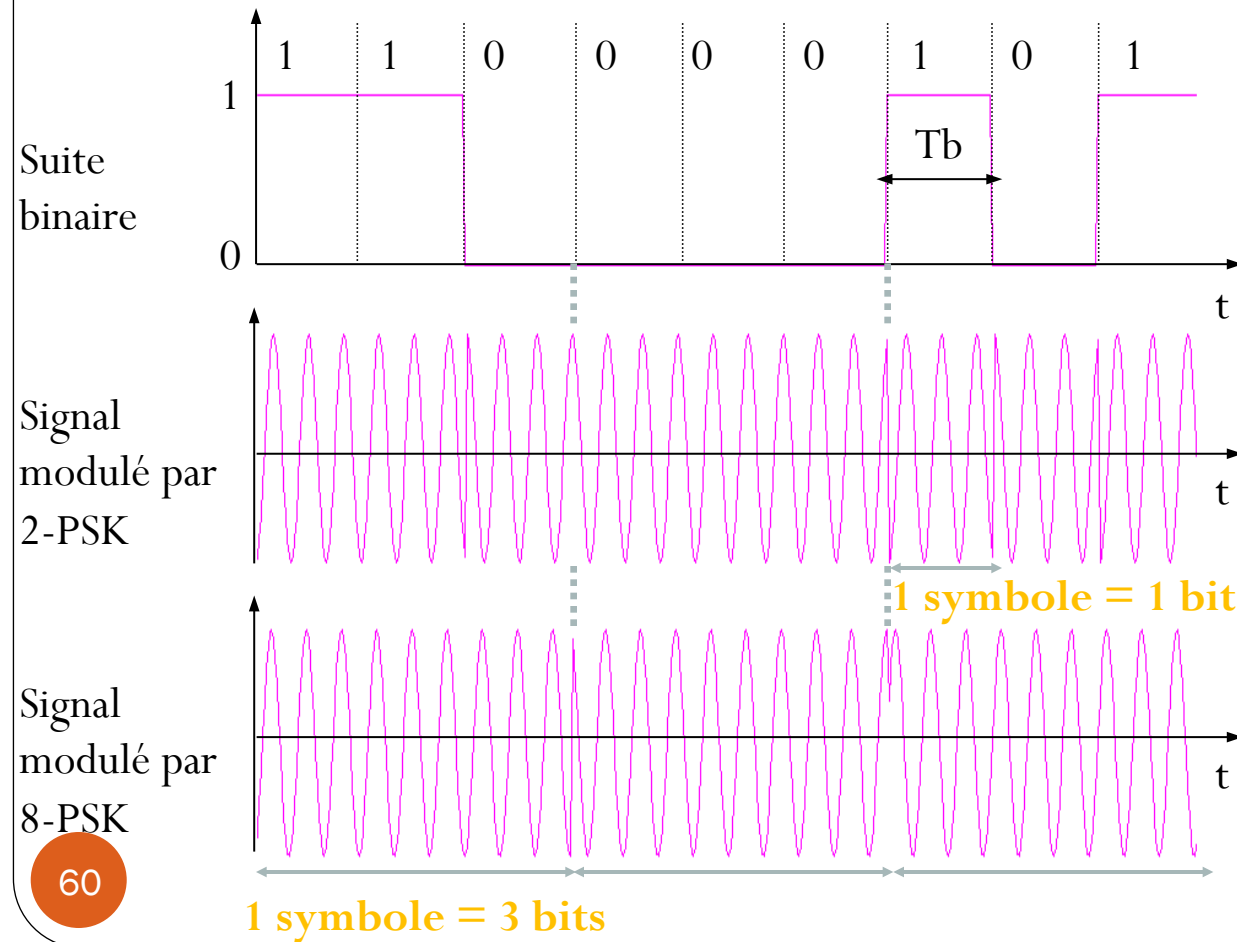


Constellation :

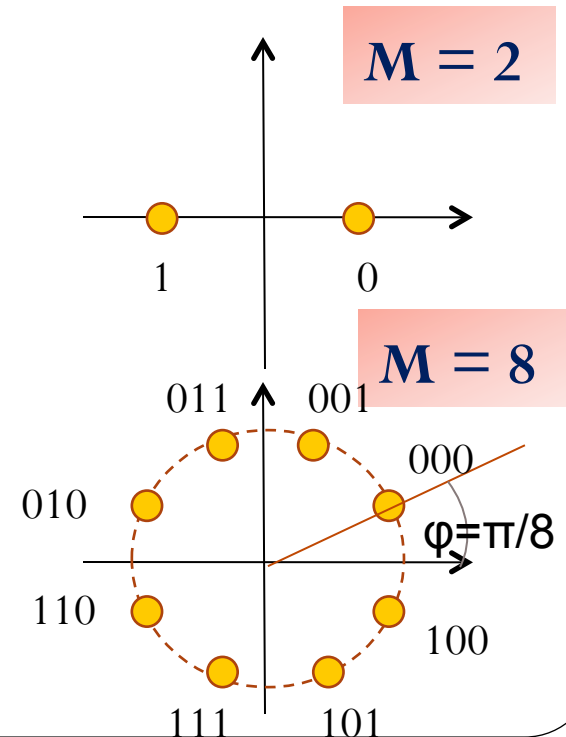


M-PSK

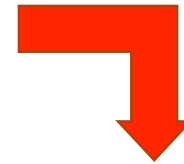
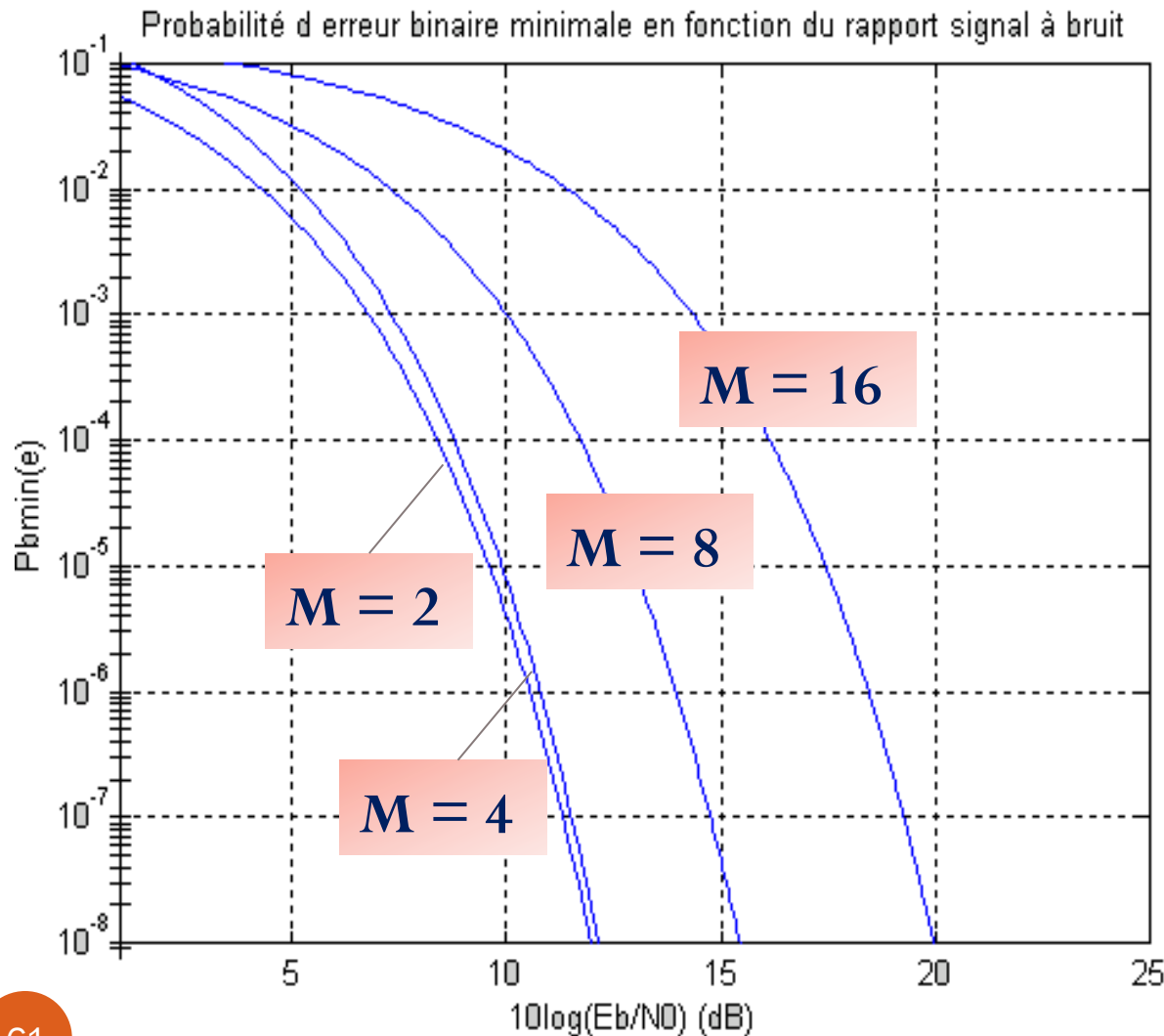
- M états de phase
- n bits par symbole. $M=2^n$.



Constellations :



Performances de la modulation de phase

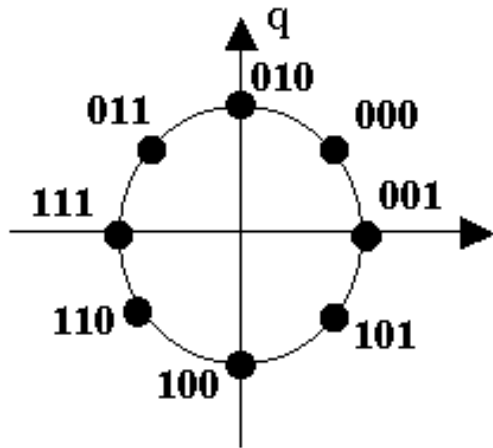


La probabilité d'erreur augmente avec le nombre d'états de modulation.

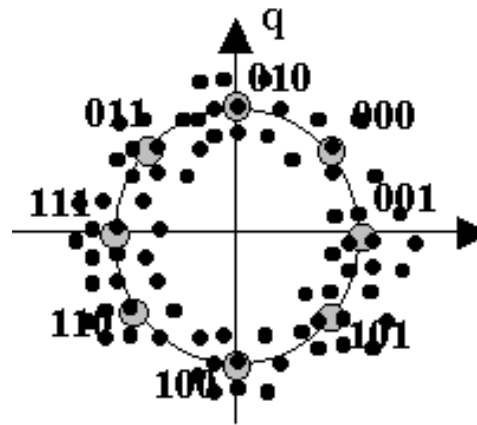
Modulation de phase et bruit

M élevé, donc D élevé

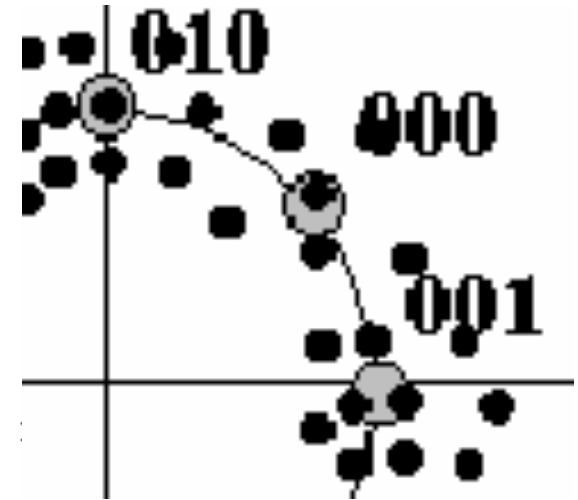
Mais : Probabilité d'erreur augmente!



Sans bruit



Avec bruit



$$A \sin(2\pi f t + \pi/4)$$

$$(A + \Delta A) \sin[2\pi f t + (\pi/4 + \Delta\phi)]$$

Solution : espacer les points de la constellation

⇒ augmenter la puissance d'émission ...

⇒ idée : conjuguer modulation d'amplitude et de phase.

Propriétés de la modulation de phase

Bilan :

- 😊 Bonne efficacité spectrale
- 😊 Résistance au bruit correcte jusqu'à $M=16$
- 😞 Plus complexe que la modulation d'amplitude, mais la complexité des circuits électroniques reste raisonnable.

Exemples d'utilisation :

- Transmissions par satellite (2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 16-PSK)
- Systèmes de téléphonie cellulaires japonais et américains

La modulation d'amplitude et phase

Modulation d'Amplitude et de Phase (MAQ, *Modulation d'Amplitude en Quadrature* ou **QAM**, *Quadrature Amplitude Modulation*).

- M-MAQ: M états de phase et amplitude
- n bits par symbole. $M=2^n$.

$$s_{\text{mod}}(t) = A(t) \sin(2\varphi f_p t + \varphi_p + \varphi(t))$$

Avec $(A(t), \varphi(t)) = (A_1, \varphi_1)$ ou (A_2, φ_2) ou ... ou (A_M, φ_M)
Suivant la valeur du message $m(t)$ à coder.

Le principe

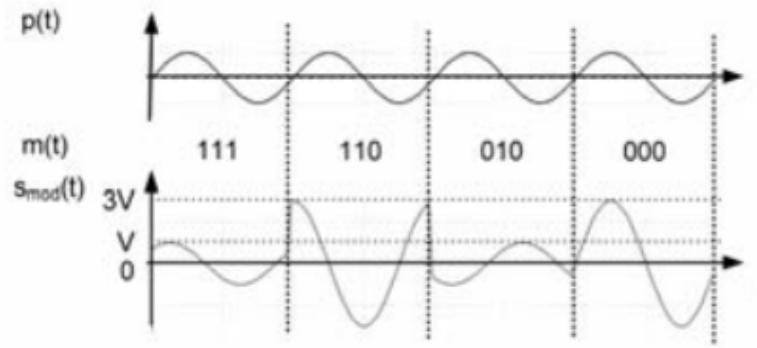
Modulation d'Amplitude et de Phase (MAQ, *Modulation d'Amplitude en Quadrature* ou **QAM**, *Quadrature Amplitude Modulation*).

- M-MAQ: M états de phase et amplitude
- n bits par symbole. $M=2^n$.

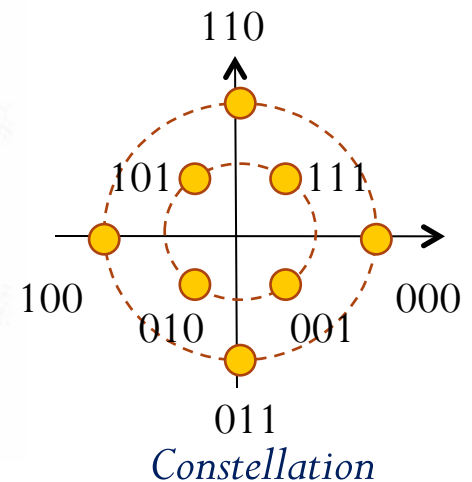
Exemple : MAQ-8

Mot	Amplitude	Phase (rad)
000	3V	0
001	V	$-\pi/4$
010	V	$-3\pi/4$
011	3V	$-\pi/2$
100	3V	$-\pi$
101	V	$3\pi/4$
110	3V	$\pi/2$
111	V	$\pi/4$

Définition des symboles



Représentation temporelle

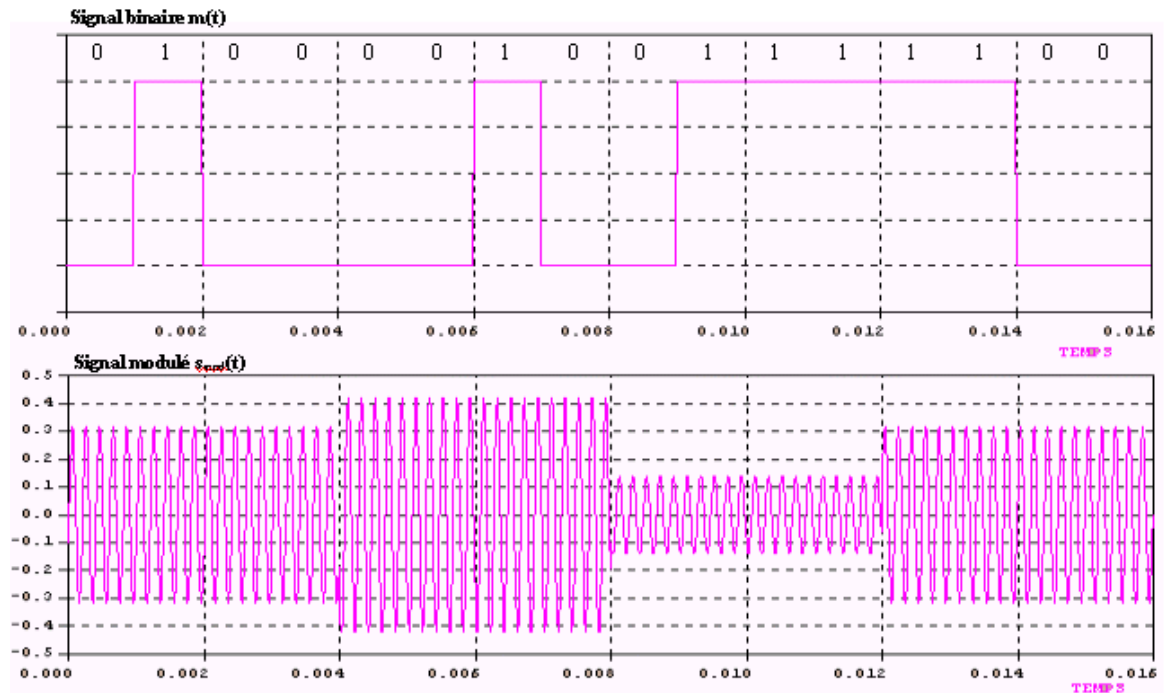
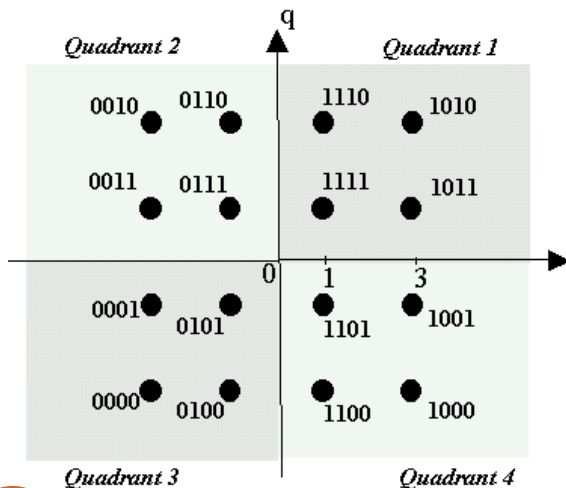


Le principe

Modulation d'Amplitude et de Phase (MAQ, *Modulation d'Amplitude en Quadrature* ou **QAM**, *Quadrature Amplitude Modulation*).

- M-MAQ: M états de phase et amplitude
- n bits par symbole. $M=2^n$.

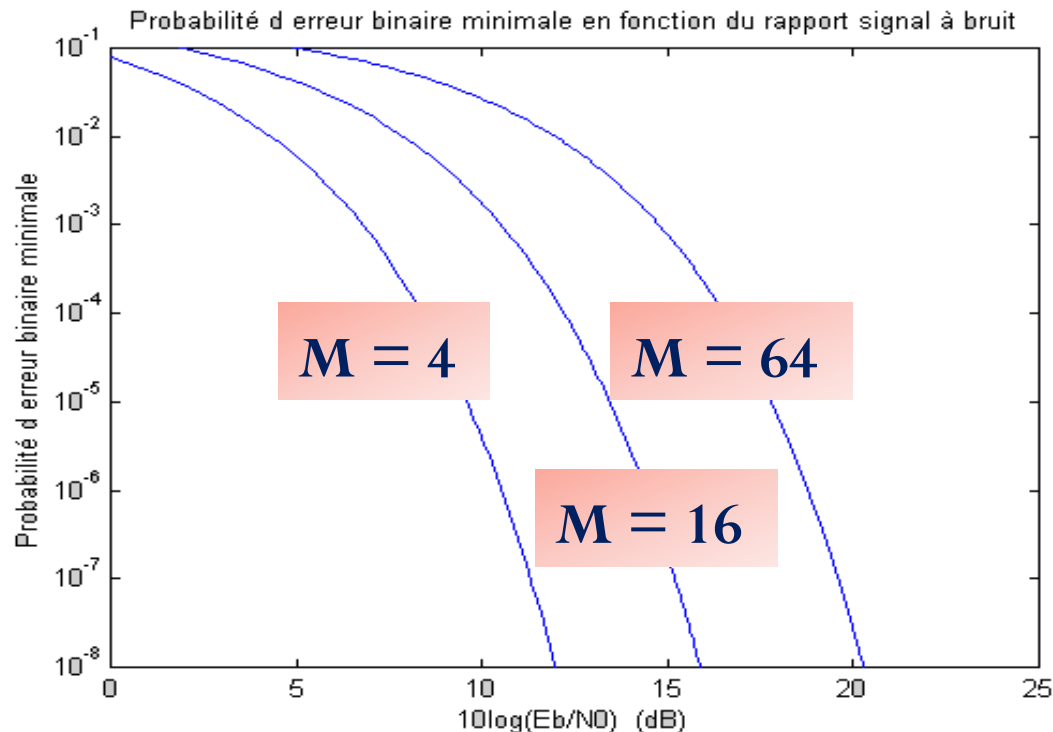
Exemple : MAQ-16



Efficacité de la modulation MAQ

➤ Plus efficace que les modulations ASK et PSK du point de vue de la résistance au bruit : économie de puissance.

Utilisation : Modem V90 (56kbit/s) MAQ 16 à 64; télévision numérique terrestre; réseaux sans fils norme IEEE 802.11a (OFDM)



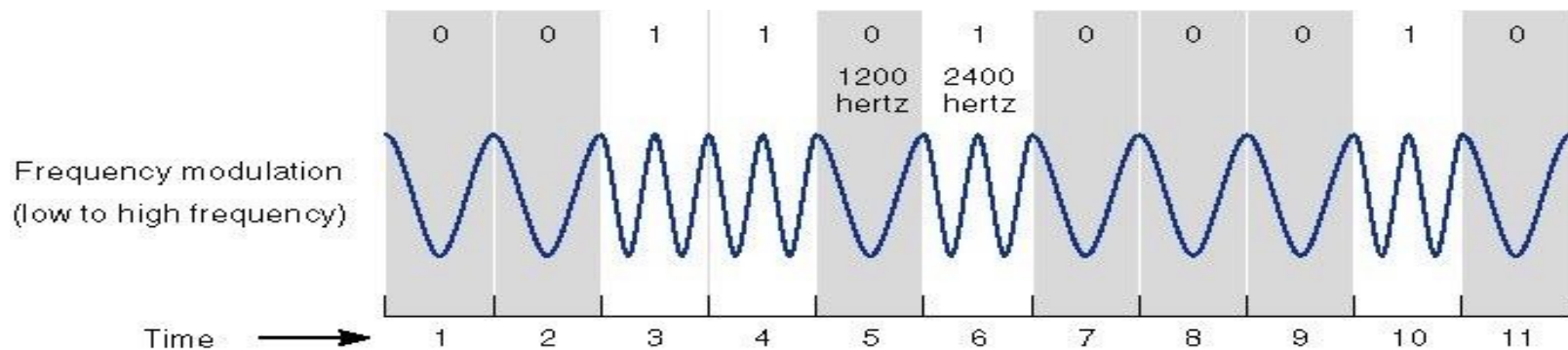
La modulation de fréquence

Modulation de fréquence (FSK, *Frequency Shift Keying* ou *MDF*, *Modulation par déplacement de fréquence*)

$$s_{\text{mod}}(t) = A_p \sin(2\pi f(t)t + \phi_p)$$

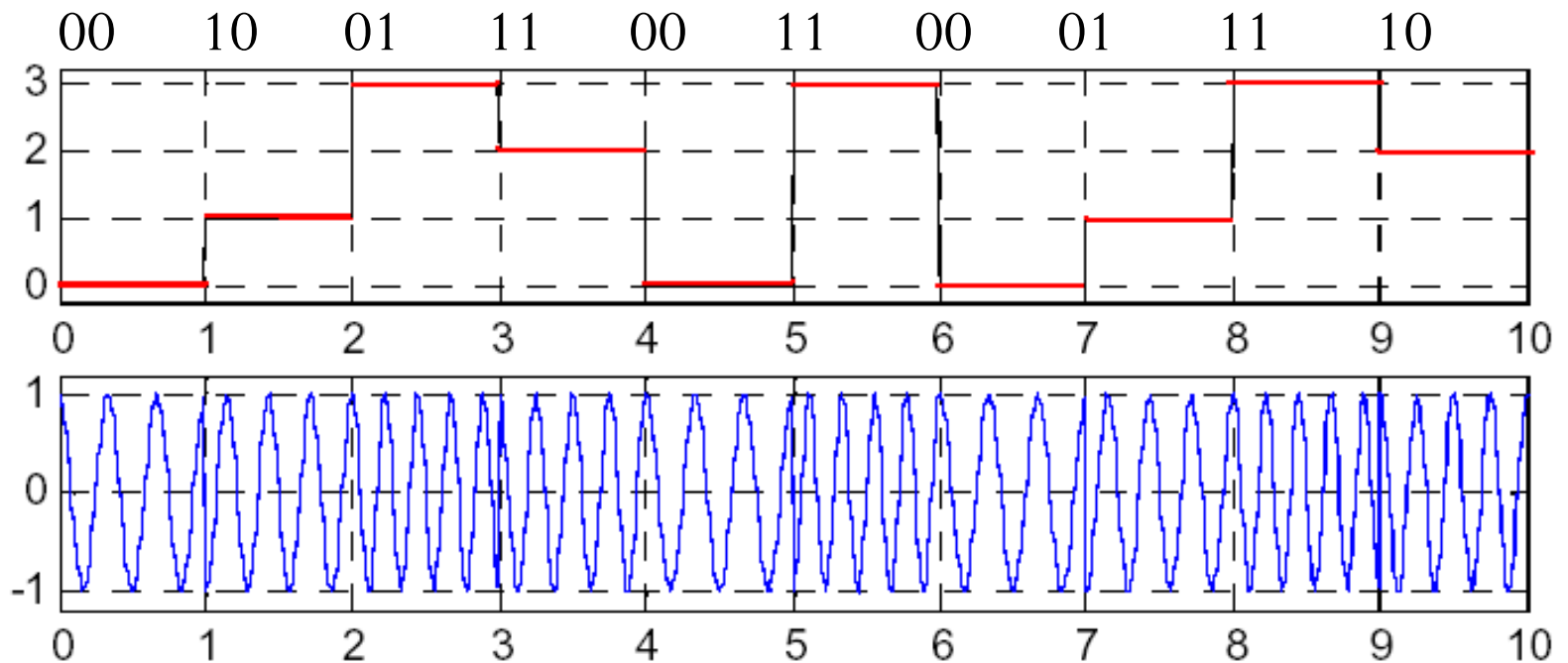
bit “ 1 ” $\rightarrow$ fréquence $f(t) = 2 f_p$,

bit “ 0 ” $\rightarrow$ fréquence de porteuse $f(t) = f_p$.



Modulation de fréquence à M états

- On utilise $M=2^n$ états de fréquence. Chaque état transporte n bits. On parle de M-FSK.



Exemples de modulation 4-FSK

Performances de la modulation de fréquence

La résistance au bruit diminue, avec le nombre d'états. En fait cela veut dire si le niveau de bruit est constant dans la bande, pour une même probabilité d'erreur, la puissance nécessaire au transport d'un bit est plus faible. Cela signifie en fait que l'augmentation du nombre d'états de modulation ne rends pas la modulation moins fiable.

Bilan:

- 😊 Plus résistante au bruit que la MA
- 😞 Largeur de bande plus importante (augmente avec M)
- 😞 Circuits de modulation/démodulation plus complexes

Utilisation :

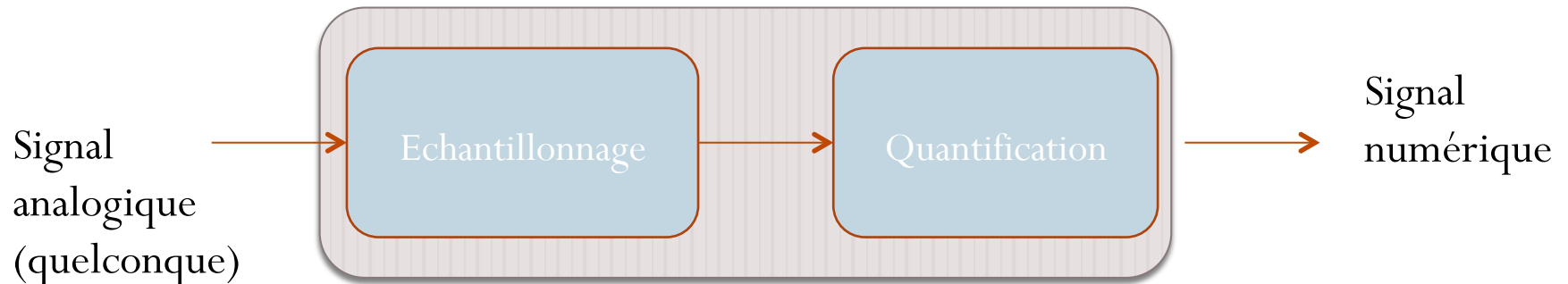
Minitel, carte bancaire, carte vitale

GMSK = modulation sophistiquée utilisée pour le GSM.

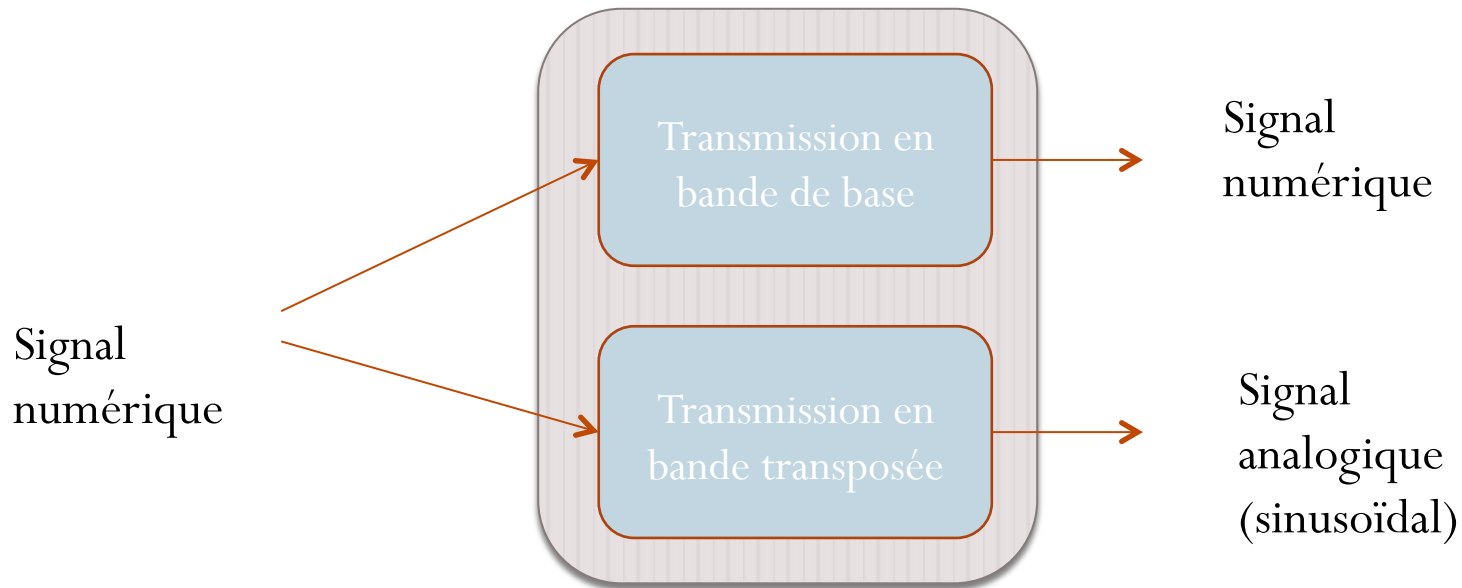
En résumé ...

- La transmission d'un signal en bande transposée repose sur la technique de modulation.
- La modulation est le processus qui transforme le signal original en une forme adaptée au canal de transmission
- Le signal modulé correspond à un signal de porteuse, qui a été modifié en amplitude, phase, ou fréquence.
- L'augmentation du nombre d'états différents permet d'augmenter l'efficacité spectrale. Cependant, cela entraîne une augmentation de la probabilité d'erreur de transmission.

Conclusion



Numérisation



Transmission