

B34 - Modulation & Modems

• Caractéristiques d'un canal de communication

- Définitions

- * *Half Duplex* ou *simplex* : transmission un sens à la fois ; exemple : talky-walky
- * *Full Duplex* ou *duplex* : transmission deux sens simultanés ; exemple : téléphone
- * *Modulation* : translation du spectre d'un signal basse fréquence vers une bande haute fréquence, centrée sur une fréquence porteuse F_0 .
- * *Transmission en bande de base* : transmission sans modulation
- * *Symbole* : un état physique élémentaire (exemple : un niveau de tension)
- * *Alphabet* : ensemble de symboles (exemple : en logique TTL, l'alphabet binaire est formé de deux symboles, qui sont les niveaux de tension 0V et +5V).
- * *Valence Q* : taille de l'alphabet. En binaire, $Q = 2$.
- * *Moment Δ* : durée élémentaire d'un symbole (exprimée en seconde)

- Propriétés

- * *Rapidité de modulation* ou *débit de moments* :

$$R = 1/\Delta \text{ (exprimée en symboles/s ou bauds)}$$

- * *Théorème de shannon* : la rapidité maximale de modulation R_{\max} est liée à la bande passante B_P d'un canal de communication par la relation :

$$R_{\max} = 2 B_P$$

Par exemple, pour le téléphone analogique, qui transmet la voix filtrée entre 300 et 3400 Hz, $B_P = 3100$ Hz et $R_{\max} = 6200$ bauds.

- * *Débit binaire* :

$$D = R \log_2 Q \text{ (exprimé en bit/s)}$$

⇒ en binaire, $D = R$, donc : 1 baud = 1 bit/s.

NB : si l'on employait 8 niveaux de tension distincts par exemple au lieu de 2, on aurait $D = 3R$, soit 1 baud = 3 bit/s.

- * *Rapport signal sur bruit* du canal de transmission :

$$r_{S/B} = 10 \log \frac{P_S}{P_B}$$

où P_S et P_B sont respectivement la puissance du signal utile et la puissance du bruit. Pour une ligne téléphonique ce rapport est d'environ 30dB.

* *Capacité d'un canal de transmission C* : c'est le débit binaire maximal. Le débit binaire est limité par le rapport signal sur bruit. On montre que :

$$C = B_P \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) \approx \frac{1}{3} B_P (r_{S/B})_{dB}$$

Pour une ligne téléphonique analogique on trouve $C \approx 31\,000$ bits/s.

• Transmission en bande de base

- Standard "Boucle de courant"

"1" : $I = 20$ mA

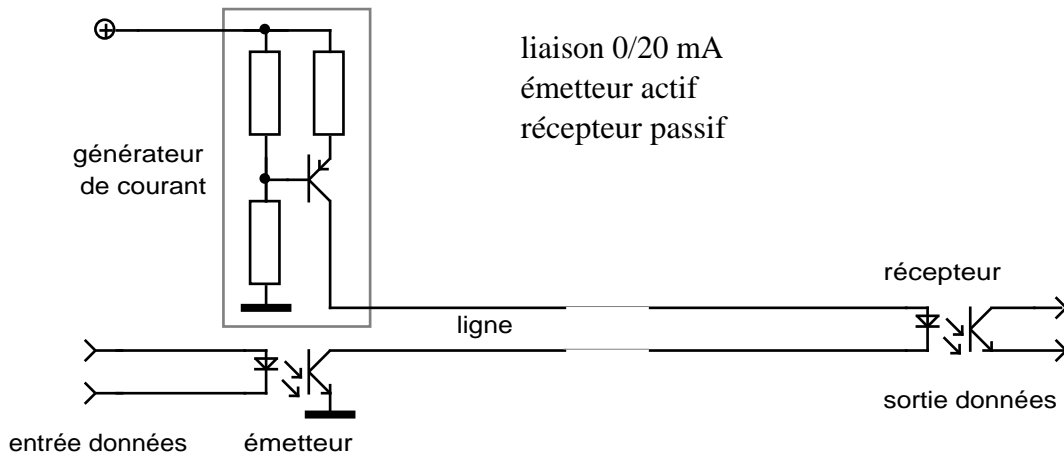
"0" : $I = 0$ ou 4 mA

Deux boucles sont nécessaires si on veut communiquer dans les deux sens (liaison duplex)

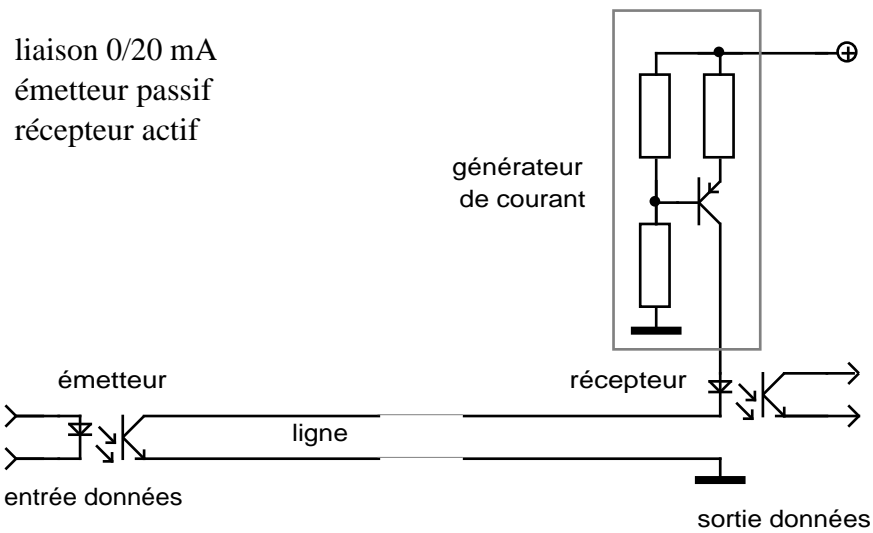
Débit variable selon la longueur de la boucle : 1 km à 4800 bauds, 10 km à 300 bauds.

Schéma électrique d'une boucle : deux cas possibles :

a)



b)

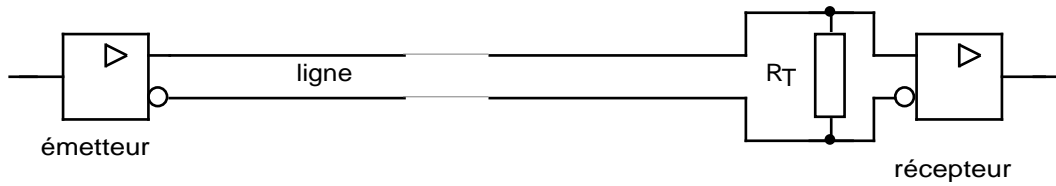


- Standards NRZ ("Non Retour à Zéro")

Durée élémentaire d'un bit : Δ

NRZ	logique positive	logique négative
unipolaire		
bipolaire		

Schéma électrique d'une liaison différentielle unidirectionnelle avec résistance de terminaison (ex. : RS422) :



Même schéma, mais avec limitation de la tension de mode commun :

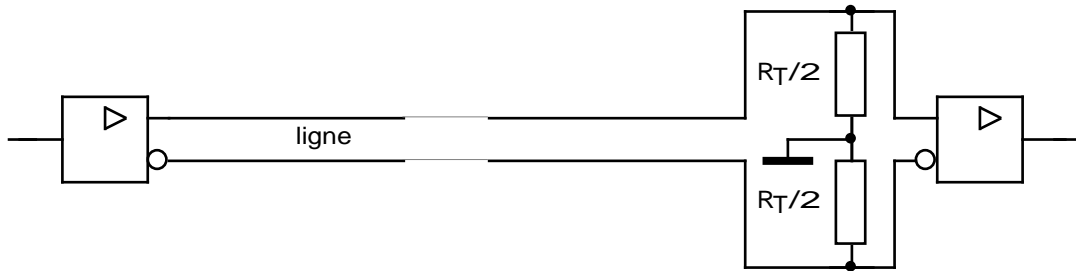
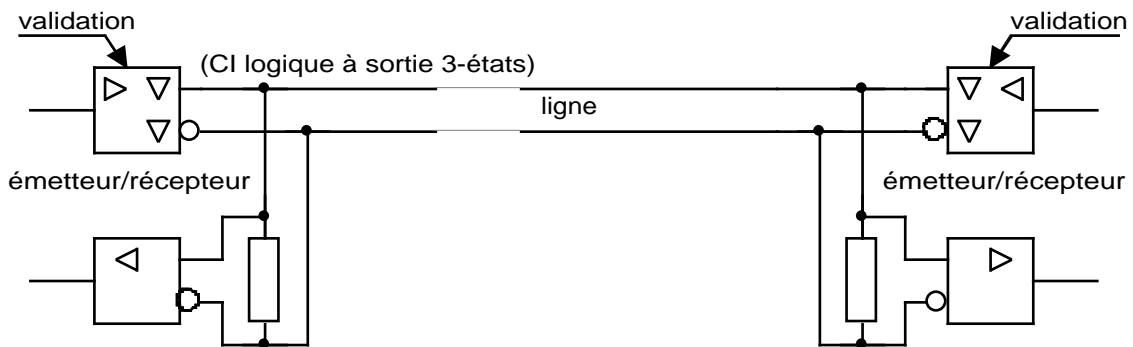


Schéma électrique d'une liaison différentielle bidirectionnelle avec résistances de terminaison à chaque extrémité de la ligne (ex. : RS485) :



	RS 232	RS422	RS 485
liaison physique	mode masse commune 3 fils minimum	mode différentiel 2 fils d'émission 2 fils de réception 1 fil de masse (souvent le blindage)	mode différentiel 2 fils pour l'émission et la réception 1 fil de masse (souvent le blindage)
type de liaison	full duplex, unidirectionnelle	full duplex, unidirectionnelle	half duplex, bidirectionnelle
câble	-	paire torsadée	paire torsadée
niveaux électriques	0 1	$\Delta U > 200 \text{ mV}$ $\Delta U < -200 \text{ mV}$	$\Delta U > 200 \text{ mV}$ $\Delta U < -200 \text{ mV}$
Nombre d'appareils sur la ligne	1 émetteur 1 récepteur	1 émetteur jusqu'à 20 récepteurs	jusqu'à 32 émetteurs ou récepteurs
Résistance de terminaison de ligne	sans	100 Ω	100 Ω
Distance maximale	15 m	1200 m	1200m

- Standards RZ ("Retour à Zéro")

RZ	logique positive	logique négative
unipolaire		
bipolaire		

Le mode de transmission véritablement de type "retour à zéro" correspond dans le tableau ci-dessus aux cas unipolaires.

Les transitions ont lieu au milieu de chaque bit. Ce codage revient à diminuer la durée d'un bit en la divisant par 2, donc à doubler la fréquence de transmission et la bande passante de la ligne.

L'intérêt d'un tel mode de transmission réside dans la facilité avec laquelle il est possible de reconstruire le signal d'horloge à la réception à partir de la succession des fronts, et donc d'échantillonner le signal reçu à une cadence conforme au débit d'émission (ce qui n'est pas possible en mode NRZ dans l'éventualité d'une longue suite de 0 ou de 1).

Le codage réellement utilisé (sur les réseaux ethernet à la norme IEEE 802.3) est appelé codage *Manchester* : dans le tableau ci-dessus, il correspond au cas bipolaire en logique négative.

Niveaux de tension : $\pm 0,85$ V (NB : une ligne inactive présente une tension nulle)

Débit : 10 ou 100 Mbit/s

• **Modulations analogiques continues**

A : amplitude

f : fréquence du signal modulant

F_0 : fréquence du signal modulé ("porteuse") : $F_0 \gg f$

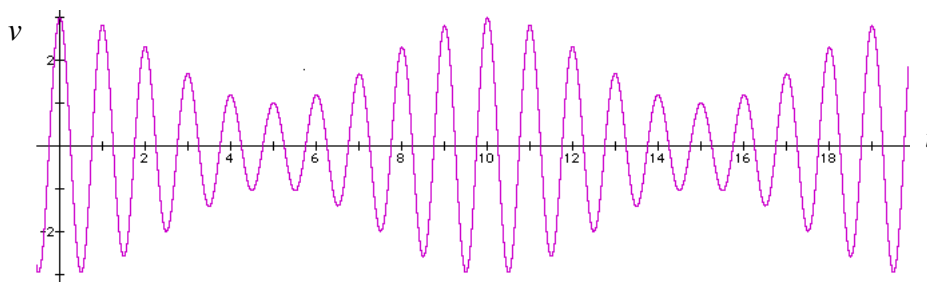
m : taux (souvent exprimé en %) de modulation

Modulation d'amplitude (MA)

$$v(t) = A (1 + m \cos 2\pi ft) \cos 2\pi F_0 t$$

Amplitude Modulation (AM)

exemple : $A = 2$; $m = 0,5$; $f = 0,1$ Hz ; $F_0 = 10 f = 1$ Hz

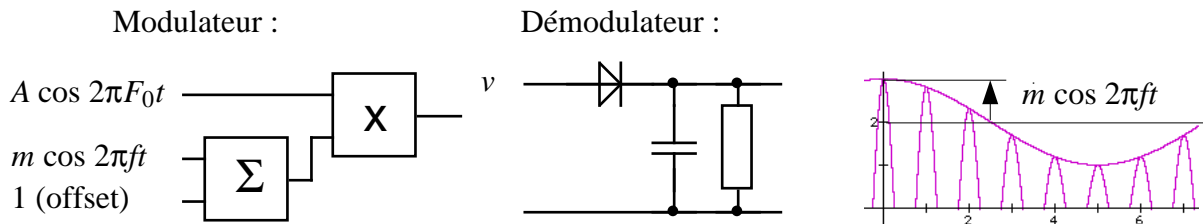


Avantage : circuits de modulation (VCO) / démodulation (filtre) simples à réaliser
spectre étroit, compris entre $F_0 - f$ et $F_0 + f$:

$$v(t) = A \cos 2\pi F_0 t + \frac{Am}{2} \cos(2\pi(F_0 + f)t) + \frac{Am}{2} \cos(2\pi(F_0 - f)t)$$

\Rightarrow largeur du spectre : $W = 2f_{\max}$

Inconvénients : rapport signal/bruit faible
sensibilité aux interférences ("parasites")
mauvais rendement : 2/3 de l'énergie (fréquence porteuse) inutilisée



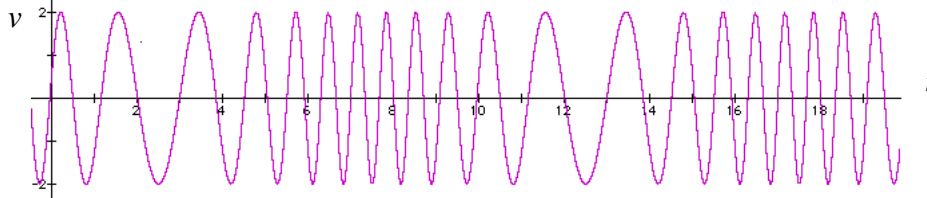
Modulation de fréquence (MF)
Modulation de phase (MP)

Frequency Modulation (FM)
Phase Modulation (PM)

En analogique, ces deux modulations sont très semblables :

$$v(t) = A \cos (2\pi F_0 t + m \cos 2\pi f t)$$

exemple : $A = 2 ; m = 5 ; f = 0,1 \text{ Hz} ; F_0 = 10 f = 1 \text{ Hz}$

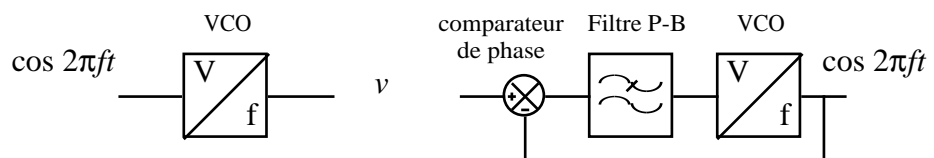


Avantage : rapport signal/bruit élevé
insensibilité aux interférences
bon rendement énergétique
NB : la modulation de phase présente un avantage supplémentaire : la largeur de son spectre est constante, et limitée : si $m < \pi$, $W < 12f_{\max}$

Inconvénients : spectre large (et complexe)
circuits de modulation / démodulation compliqués (PLL)

Modulateur :
Oscillateur commandé en tension
(VCO : Voltage Controlled Oscillator)
(cf §A26)

Démodulateur :
Boucle à verrouillage de phase
(PLL : Phase Locked Loop)

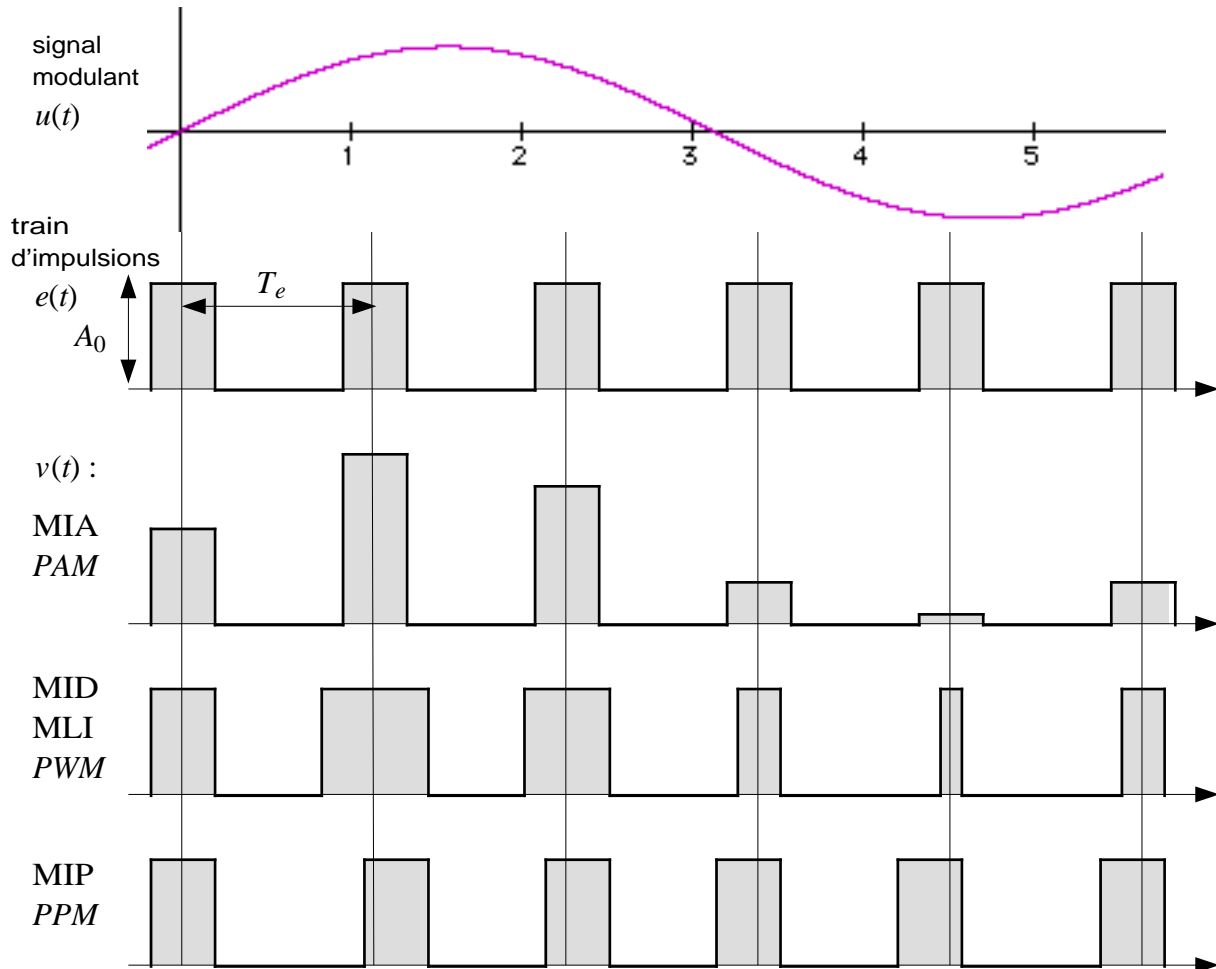


• **Modulations analogiques par impulsions**

Les impulsions sont cadencées à la fréquence d'échantillonnage F_e , qui est ici la fréquence porteuse.

Rappel : F_e doit être supérieure ou égale au double de la fréquence maximale du signal analogique (th de Shannon, cf §B15).

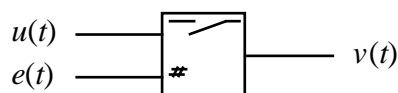
- Modulation d'impulsions en amplitude (MIA) *Pulse Amplitude Modulation (PAM)*
- Modulation de largeur d'impulsions (MLI) *Pulse Width Modulation (PWM)*
- Modulation d'impulsions en position (MIP) *Pulse Position Modulation (PPM)*



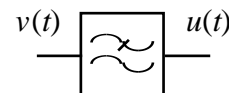
Modulation d'impulsions en amplitude (MIA) Pulse Amplitude Modulation (PAM)

Un signal MIA est un signal échantillonné (cf §B14).

Modulateur :



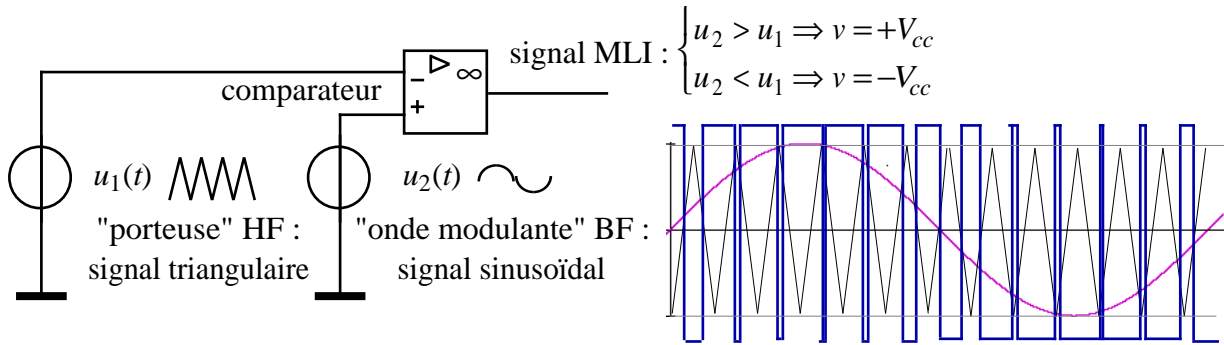
Démodulateur :



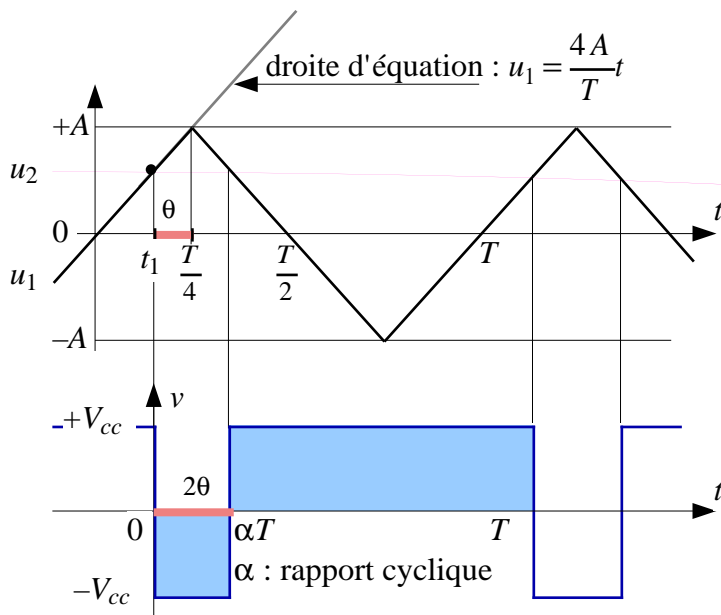
- Modulation de largeur d'impulsions (MLI) *Pulse Width Modulation (PWM)*
 ou Modulation d'impulsions en durée (MID)

Un signal MID est un signal rectangulaire à rapport cyclique variable, celui-ci étant proportionnel à l'amplitude du signal modulant.

Modulateur (exemple : modulateur analogique à porteuse triangulaire) :



On suppose que u_2 varie lentement par rapport à u_1 (d'amplitude A) :



$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{4A}{T}t \\ u_1(t_1) &= u_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow t_1 = T \frac{u_2}{4A} \\
 & \Rightarrow \theta = \frac{T}{4} - t_1 = \frac{T}{4} \left(1 - \frac{u_2}{A} \right) \\
 & \Rightarrow \bar{v} = \frac{(T - 2\theta)V_{cc} - 2\theta V_{cc}}{T} = u_2 \frac{V_{cc}}{A}
 \end{aligned}$$

La valeur moyenne du signal modulé $v(t)$ est proportionnelle à l'amplitude du signal modulant $u_2(t)$.

Démodulateur : par filtrage passe-bas.

NB : Modulation par impulsions codées (MIC)

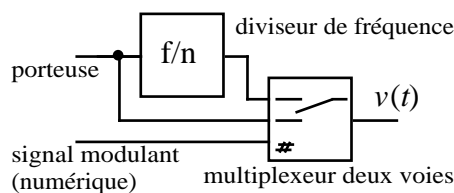
Pulse Code Modulation (PCM)

Un signal MIC est un signal échantillonné, quantifié et codé (en binaire généralement).

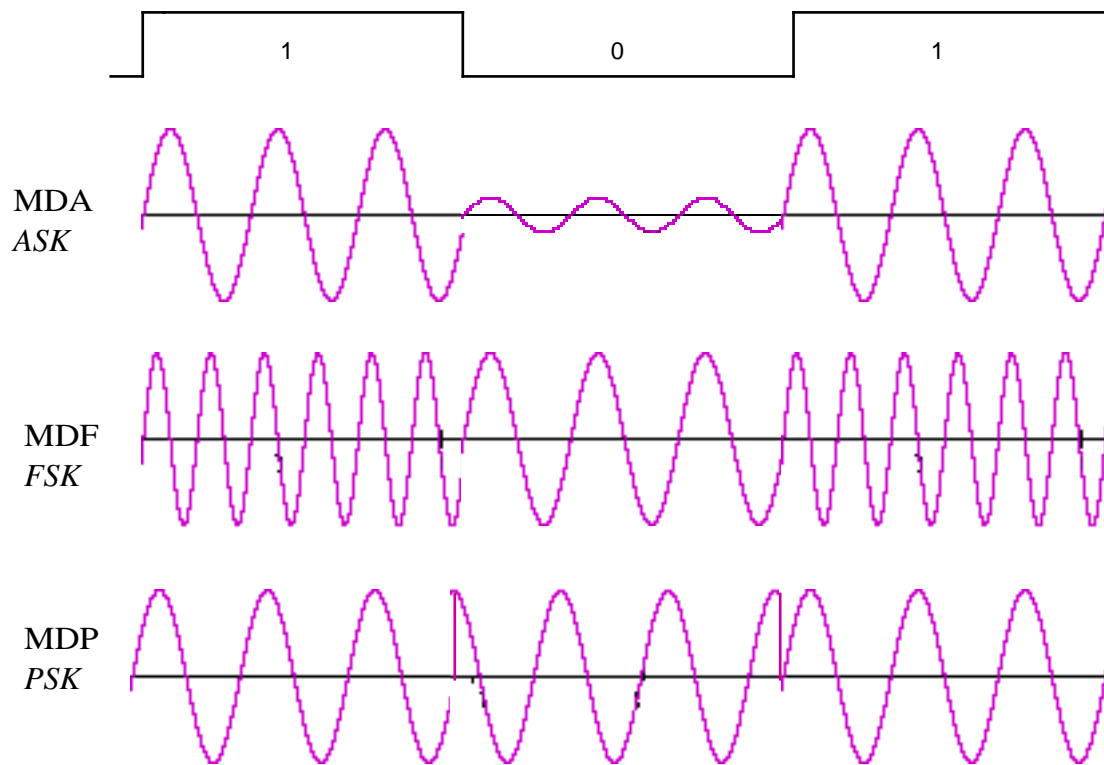
• Modulations à verouillage

- Modulation à déplacement d'amplitude (MDA) Amplitude Shift Keying (ASK)
 - Modulation à déplacement de fréquence (MDF) Frequency Shift Keying (FSK)
 - Modulation à déplacement de phase (MDP) Phase Shift Keying (PSK)
 - Mod. à dépl. d'amplitude et de phase (MDAP) Amp. and Phase Shift Keying (APSK)
- ou Modulation d'amplitude en quadrature (MAQ) Quadrature Amplitude Mod. (QAM)

Modulateur FSK :



Démodulateur FSK : idem FM (PLL)



Exemples :

- Commande de type "trains d'onde"

C'est une modulation *ASK* particulière en "tout ou rien" (= présence ou absence de porteuse). Elle est encore appelée modulation *OOSK* (*On-Off Shift Keying*).

- Protocole HART (*Highway Addressable Remote Transducer*)

Utilisé dans la configuration des transmetteurs 4-20 mA distants. Au courant analogique issu du transmetteur est superposé une onde *FSK* (donc à valeur moyenne nulle) qui porte l'information numérique.

"0" = 2200 Hz ; "1" = 1200 Hz

- Minitel

Modulation *FSK*. Le débit binaire n'est pas le même selon le sens de la transmission :

Émission à 75 bauds : "0" = 450 Hz ; "1" à 390 Hz

Réception à 1200 bauds : "0" = 2100 Hz ; "1" = 1300 Hz

- Modem

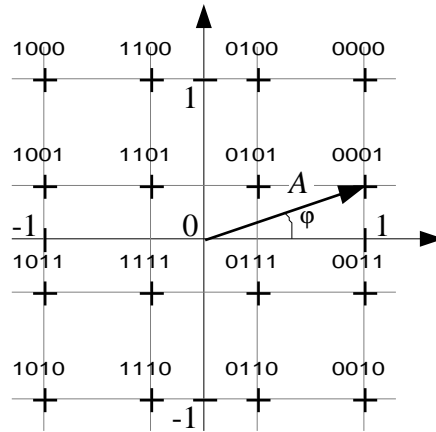
Modulation *APSK* : on module en même temps l'amplitude et la phase de la porteuse:

$$v(t) = A \cos(2\pi F_0 t + \varphi)$$

On peut considérer le signal comme étant formé de deux sinusoïdes en quadrature, d'amplitudes différentes (d'où l'appellation de *modulation d'amplitude en quadrature* ou *QAM*)

$$v(t) = A \cos \varphi \cos(2\pi F_0 t) + A \sin \varphi \sin(2\pi F_0 t)$$

Dans les modems analogiques actuels, on regroupe les bits à transmettre par groupes. Par exemple 4 bits regroupés font 16 symboles distincts (modulation "*16QAM*"), auxquels on affecte 4 amplitudes et 4 phases différentes : les 16 vecteurs de Fresnel correspondant aux 16 symboles forment ainsi une "constellation" :



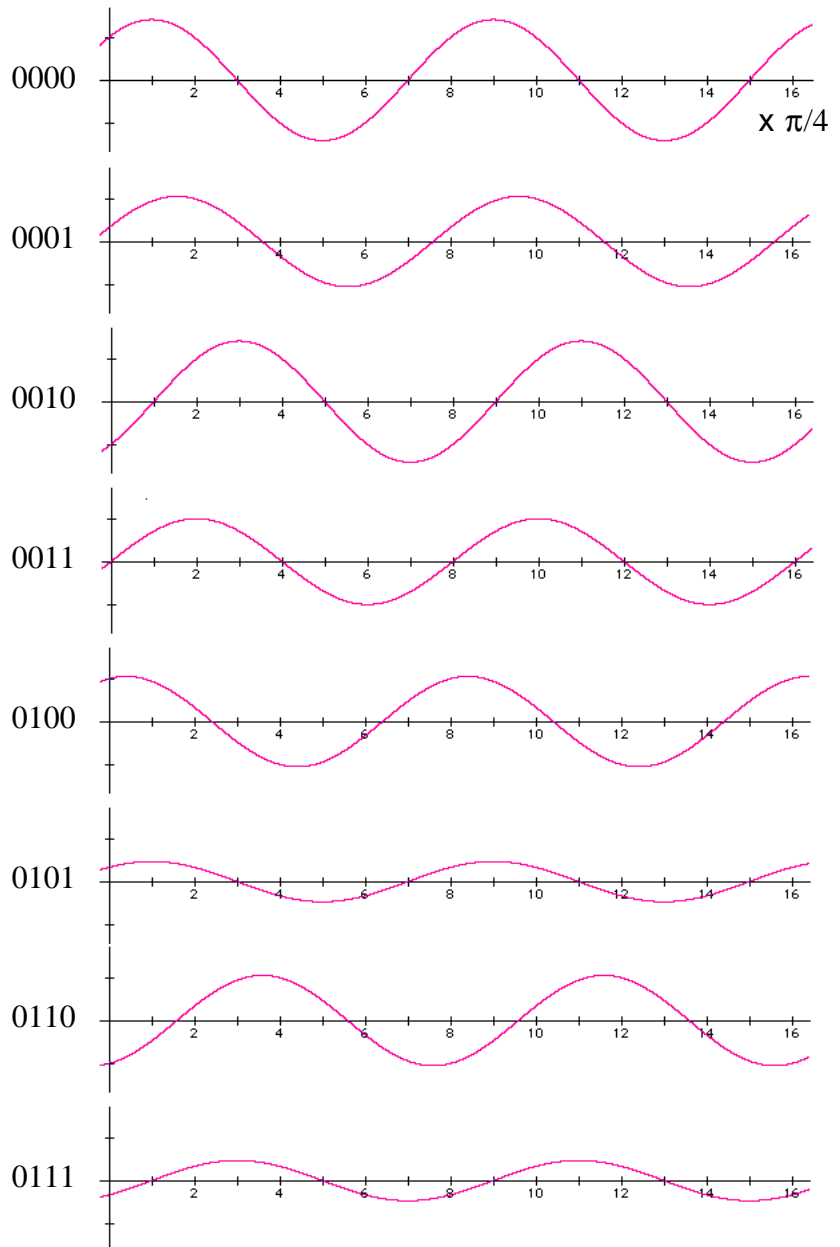
Dans cet exemple, le vecteur codant le symbole "0001" a pour paramètres :

$$A = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{3}\right)^2} \approx 1,054$$

$$\phi = \arctan \frac{1}{3} \approx 18,4^\circ$$

Une modulation 16QAM pour une rapidité de modulation de 6200 bauds (symboles par seconde) permet d'obtenir un débit binaire théorique maximal de $4 \times 6200 = 24800$ bits/s. A l'aide de techniques de traitement du signal sophistiquées (compression de données) on aboutit au débit théorique "officiel" de la norme V90 (ou V92), qui est de 56000 bits/s.

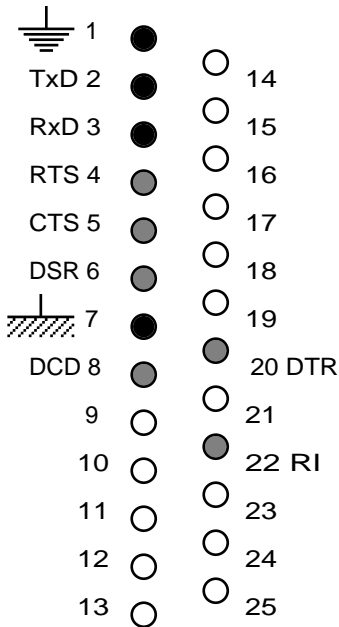
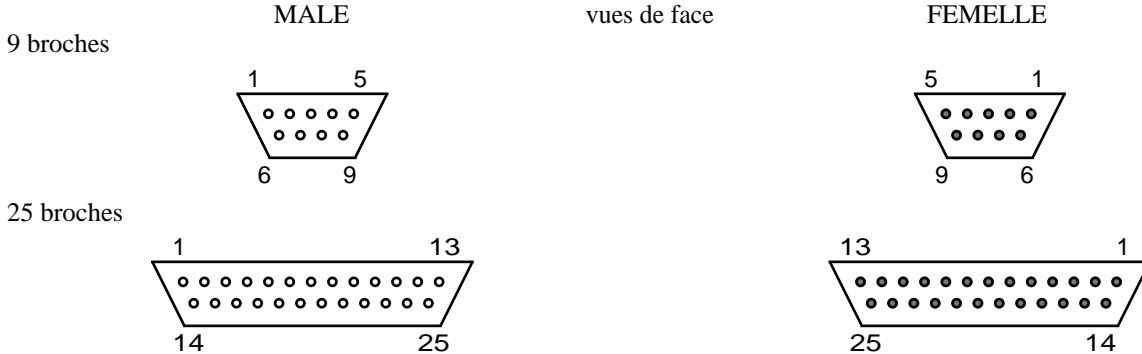
Les modems ADSL fonctionnent grâce à une modulation et une rapidité similaires (jusqu'à 256QAM en 4000 bauds), mais nécessitent une ligne téléphonique spéciale dont la bande passante est portée à 1MHz. On obtient des débits allant jusqu'à 8 Mbit/s en voie descendante, 1 Mbit/s en voie montante.



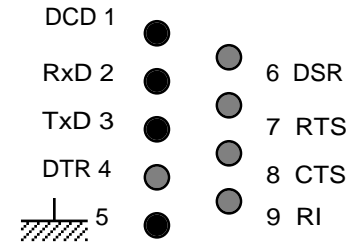
***** **COMPLEMENTS : Connectique** *****

• **RS232**

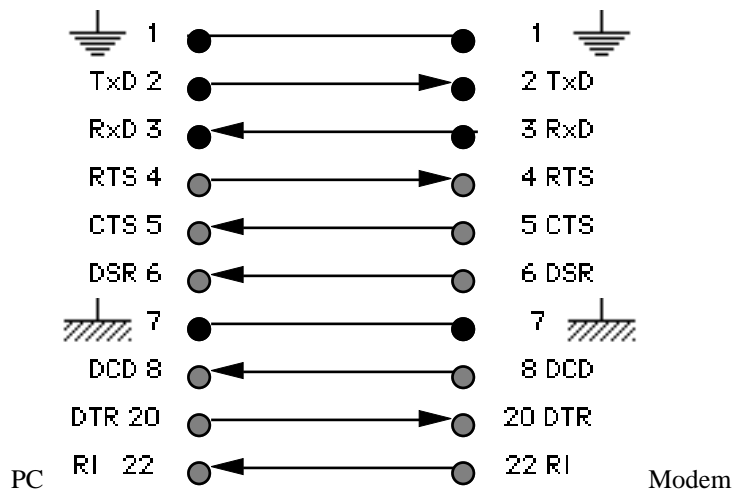
25 PIN D-SUB MALE côté DTE (Computer).
 25 PIN D-SUB FEMELLE côté DCE (Modem).

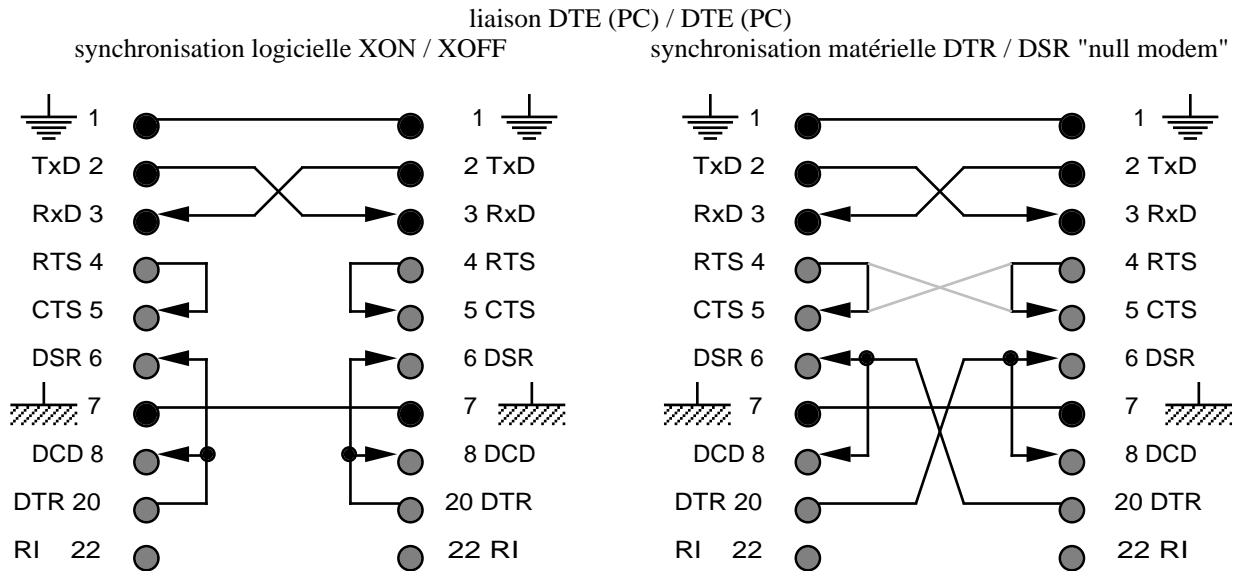


25	9	Name	Dir	Description
1	-	GND	—	Shield Ground
2	3	TXD	→	Transmit Data
3	2	RXD	←	Receive Data
4	7	RTS	→	Request to Send
5	8	CTS	←	Clear to Send
6	6	DSR	←	Data Set Ready
7	5	GND	—	System Ground
8	1	CD	←	Carrier Detect
20	4	DTR	→	Data Terminal Ready
22	9	RI	←	Ring Indicator



liaison DTE (PC) / DCE (Modem)





• **RS422**

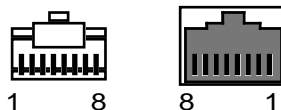
9 PIN D-SUB MALE côté DTE (Computer)
 9 PIN D-SUB FEMELLE côté DCE (Modem)

Pin	Nom	Description
1		Shield
2	RTS+	Request To Send +
3	RTS-	Request To Send -
4	TXD+	Transmit Data +
5	TXD-	Transmit Data -
6	CTS+	Clear To Send +
7	CTS-	Clear To Send -
8	RXD+	Received Data +
9	RXD-	Received Data -

• **Ethernet**

Type	Nom	Vitesse (Mbit/s)	Connectique	Câble	Longueur maxi (m)	Topologie
10Base-T	Standard Ethernet	10	RJ45	paire torsadée	100	Étoile
100Base-T	Fast Ethernet	100	RJ45	paire torsadée	100	Étoile
1000Base-T	Gigabit Ethernet	1000	RJ45	paire torsadée	100	Étoile
10Base-2	Thin Ethernet	10	BNC	RG58 (50Ω)	185	Bus
10Base-5	Thick Ethernet	10	Type N	RG8 (50Ω)	500	Bus
TokenRing		4	RJ45 ou IBM	paire torsadée	360	Étoile physique
TokenRing		16			168	Anneau logique

RJ45 FEMELLE sur la carte réseau ou le concentrateur ("hub")
 RJ45 MALE sur le câble
 NB : RX et TX sont inversés sur le hub



Pin	Nom	Description
1	TX+	Transmit Data+
2	TX-	Transmit Data-
3	RX+	Receive Data+
4	n/c	Not connected
5	n/c	Not connected
6	RX-	Receive Data-
7	n/c	Not connected
8	n/c	Not connected