

**Matière : Systèmes et Réseaux de Télécommunication**

VHS : 45h00 (cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

**Contenu de la matière :**

- Chapitre 1. Systèmes de transmission numériques
- Chapitre 2. Transmission de données
- Chapitre 3. Modems et Interfaces
- Chapitre 4. Protection contre les erreurs
- Chapitre 5. Réseaux de télécommunications

**Mode d'évaluation :** Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

**Références bibliographiques :**

1. Tanenbaum ; Réseaux ; 4ème édition, Prentice Hall, 2003.
2. R. Parfait ; Les réseaux de télécommunications ; Hermes science publications, 2002.
3. E. Hollocou ; Techniques et réseaux de télécommunications ; Armand Colin, 1991.
4. C. Servin ; Réseaux et télécoms ; Dunod, Paris, 2006.
5. D. Dromard et D. Seret ; Architectures des réseaux ; Editions Pearsont, 2009.
6. P. Polin ; Les réseaux : principes fondamentaux ; Edition Hermès.
7. D. Comer ; TCP/IP, architectures, protocoles et applications ; Editions Interéditions.
8. D. Présent, S. Lohier ; Transmissions et Réseaux, cours et exercices corrigés ; Dunod.
9. P. Clerc, P. Xavier ; Principes fondamentaux des Télécommunications ; Ellipses, Paris, 1998.
10. D. Battu ; Initiation aux Télécoms : Technologies et Applications ; Dunod, Paris, 2002.
11. P. Rolin, G. Martineau, L. Toutain, A. Leroy ; Les réseaux, principes fondamentaux ; édition Hermès, 1997.
12. G. Pujolle, Cours réseaux et télécoms : Avec exercices corrigés, 3<sup>e</sup> édition ; Eyrolles, 2008.
13. V. Breton, Ph. Boniface ; Télécommunications et réseaux ; Memotech, Eyrolles, 2014.
14. R. L. Freeman ; Telecommunication System Engineering ; John Wiley & Sons, 2004.

## **Chapitre 1 : Systèmes de Transmission Numériques**

### **1. DEFINITIONS**

#### **1.1 Télécommunication**

Le mot télécommunication vient du préfixe grec 'tele' signifiant loin, et du latin 'communicare', signifiant partager. Le mot télécommunication a été utilisé pour la première fois, en 1904, par l'ingénieur aux postes et aux télégraphes Édouard Estaunié. On entend par télécommunications toute transmission (émission et réception) à distance, d'informations (signes, symboles, textes, images (fixes ou animées), sons ou autres) de toute nature sous forme analogique ou numérique (voix, caméra vidéo, fichier électronique, ...), par des moyens à base d'électronique et d'informatique (fil électrique, radioélectricité, liaison optique, ou autres systèmes électromagnétiques air, lignes métalliques, fibre optique), entre différents utilisateurs et de leur permettre de dialoguer.

#### **1.2 Systèmes de télécommunications**

Le système de télécommunications est un ensemble de liaisons et de fonctions permettant d'assurer un service, exemple le système de satellite Inmarsat, destiné aux communications mobiles. Dans un système de télécommunications, il existe deux caractéristiques fondamentales: la puissance d'émission et la bande passante. Selon les systèmes, une des ressources peut être plus importante, systèmes limités en puissance, exemples : téléphone mobile (la durée de vie des batteries), satellite (énergie solaire) ou systèmes limités en bande, exemples le téléphone fixe (la puissance n'est pas précisément un problème).

#### **1.3 Réseau de télécommunications**

Un réseau de télécommunication est un ensemble des équipements et des supports de transmission dont une des fonctions est de permettre le transfert d'informations. Les réseaux sont nés d'un besoin d'échanger des informations de manière simple et rapide entre des machines. Ils sont donc arrivés à relier d'abord ces machines entre elles (les réseaux locaux). Plus tard ils ont éprouvé le besoin d'échanger des informations entre des sites. Exemples de réseaux de télécommunications : réseau de télévision, réseau informatique, réseau de téléphonie mobile, réseau aéronautique (permet le contrôle automatique de l'état de l'avion en vol), réseau internet, ... .

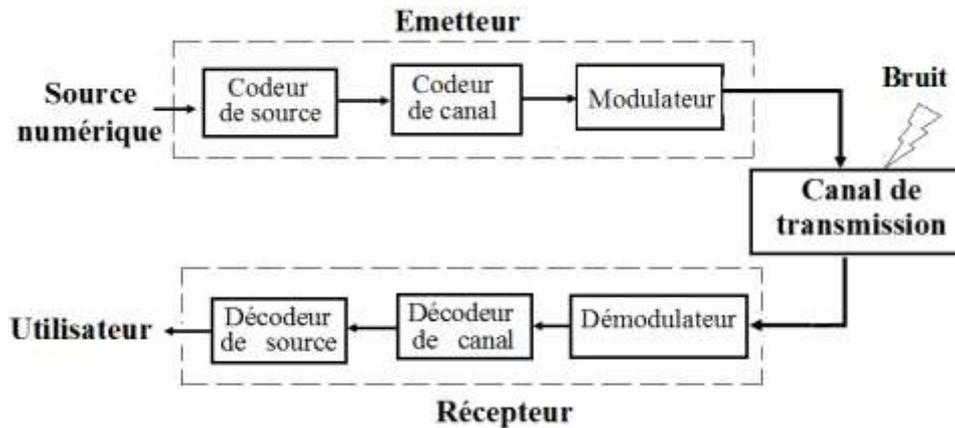
### **2. Systèmes de transmission numériques**

Un système de transmission contient plusieurs équipements (ordinateurs, équipements électroniques, téléphones, assistants numériques personnels...) situés à distance les uns des autres. On distingue deux types de systèmes de transmission:

- Système de transmission analogique qui transmet les signaux analogiques sous la forme d'une onde
- Système de transmission numérique transmet des signaux numériques.

## 2.1 Chaîne de transmission numérique

La chaîne de transmission, dans sa structure fonctionnelle la plus simple, est constituée, comme indique la figure suivante, d'un émetteur, un canal de transmission et un récepteur.



**La source:** dispositif qui génère les messages, exemples: un ordinateur, un convertisseur A/N, ... .

**L'émetteur :** a pour fonction d'adapter le signal issu du transducteur (microphone, voix humaine, clavier, capteur, mouvement objet, thermocouple, ...) en vue de le transmettre au canal de transmission. Il peut contenir plusieurs équipements :

- **Le codeur source:** dispositif servira à réduire la redondance dans les données générées par la source afin de substituer un message aussi court que possible au message émis par la source, dans la mesure où cette substitution est réversible (i.e. que le message initial peut être exactement restitué), exemples: codeur de parole, codeur d'images, ...
- **Le codeur canal:** dispositif capable de protéger l'information contre les perturbations du canal de transmission et corriger les erreurs de transmission, exemples: codes détecteurs d'erreurs, codes correcteurs d'erreurs, ... .
- **Le modulateur:** change généralement la forme physique du signal et peut être modulateur de fréquence, d'amplitude ou de phase, numérique ou analogique.

**Le canal de transmission :** c'est un support qui permet au récepteur de recevoir l'information émise par l'émetteur. De nombreux supports sont utilisés : fils (câble coaxial, guide d'onde, fibre optique,...), lumière infra-rouge, l'air, l'atmosphère, ..., etc.

**Le récepteur :** Son rôle est recevoir le signal émis et le rendre compatible avec le transducteur (haut-parleur, son, écran, image, signal de commande, actionneur (vanne, pompe)) servant à la réception. Le récepteur est constitué des blocs suivants :

- Démodulateur (le détecteur): c'est la partie où s'effectue la détection optimale
- Décodeur canal : qui assure la détection et la correction des erreurs.
- Décodeur source : c'est la partie de remise en forme des données numériques reçues

## 2.2 Organismes de normalisation

Un organisme de normalisation est un organisme dont les activités premières sont l'établissement puis le maintien de normes destinées à des utilisateurs extérieurs à cette organisation.

Le processus de normalisation pour les télécommunications est actuellement distribué dans de nombreux organismes dans lesquels interviennent les opérateurs, les constructeurs, les usagers et les régulateurs. On peut distinguer les principales organisations:

**UIT (Union Internationale des Télécommunications):** Basée à Genève (Suisse), l'UIT a été créée en 1865. Elle établit les normes des technologies de l'information et de la communication, diffuse toutes les informations techniques nécessaires de télécommunications, gère l'attribution des bandes de fréquences radioélectriques et assigne les orbites aux satellites envoyés dans l'espace. Son domaine s'étend aussi à l'internet haut débit, aux dernières technologies de communications, au maritime et aéronautique, à la météorologie par satellite, et aux réseaux mobiles de nouvelle génération.

**ANSI Commuté T1 (American National Standard Institute, commette T1 on Telecommunications) :** Créé en février 1984, ANSI élabore des normes techniques et des rapports concernant l'interconnexion et l'interopérabilité des réseaux de télécommunications.

**ETSI: European Telecommunications Standards Institute :** Basée en France, cette organisation, créée en 1988, a la mission de déterminer et de produire des normes de télécommunications qui seront utilisés pour les décennies à venir.

**TTC: Japanese Telecommunications Technology Committee :** créée en 1985 pour mener des recherches et élaborer des normes pour les télécommunications au Japon

### **3. Supports et canaux de transmission**

#### **3.1 Définition**

Le canal est le support de transport de l'information entre les entités communicantes. Un canal de transmission ne se limite pas seulement au support physique du transfert de l'information. Il comprend aussi les dispositifs en entrée et en sortie du support de transmission qui vont aider à l'émission, à la réception et à l'extraction correcte des données numériques.

#### **3.2 Les différents types de canaux de transmission**

##### **3.2.1 Les supports guidés (Supports fixes)**

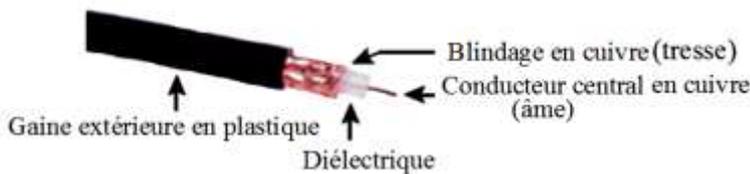
**a) La paire de fils torsadés :** Elle est constituée d'une ou de plusieurs paires de fils électriques enroulés de façon hélicoïdale qui permet de réduire les perturbations. Ce support est réservé pour les transmissions à bas débit (inférieur à 2 Mbits/s). Son principal inconvénient est son affaiblissement, ce qui limite leur usage à des communications sur de courtes distances. Ses avantages sont nombreux: techniques très bien connue, facilité de connexion, ajout de nouvelles entrées sans problème, coût faible....

**b) Le câble coaxial:** est constitué de deux conducteurs cylindriques, l'âme et la tresse, séparés par un isolant. Son isolant et son blindage permettent de limiter les perturbations électromagnétiques dues au bruit externe. Le câble coaxial présente un milieu de propagation quasi uniforme le long de la ligne, possède une bande passante plus importante et permet de réaliser des transmissions avec un débit relativement élevé (jusqu'à 565 Mbits/s sur le réseau téléphonique).

**c) La fibre optique** : est constituée d'un fil cylindrique en verre ou en plastique très fin (diamètre entre 100 et 300 $\mu$ m), à base de silice, conduisant la lumière, et recouverte d'isolant qui sert à éviter les problèmes de diaphonie (perturbation d'un signal par un signal voisin) entre les différentes fibres. Dans la fibre optique une impulsion lumineuse représente l'information binaire 1 tandis que l'absence de lumière représente l'information binaire 0. Les avantages de la fibre optique sont nombreux : petite taille, faible poids, grande souplesse, une large bande passante (1GHz pour 1km) qui permet le multiplexage sur un même support de très nombreux canaux (télévision, téléphone, ...), des très grands débits sur de très longues distances, une faible atténuation (0.2 dB/km) et l'insensibilité aux parasites électromagnétiques. L'inconvénient des fibres optiques est leur coût très élevé, la transmittance courant/flux limite la bande passante.



Fils torsadés



Câble coaxial



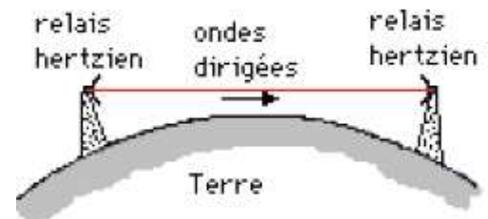
Fibre optique

### 3.2.2 Les supports non guidés (éther) ou supports libres

L'utilisation des ondes électromagnétiques permet la transmission des signaux sur un support immatériel, désigné par le terme d'éther, qui peut être l'atmosphère ou le vide. Elle est pratiquement indispensable dans le cas de liaisons très longues distances. Ce type de transmission comprend principalement :

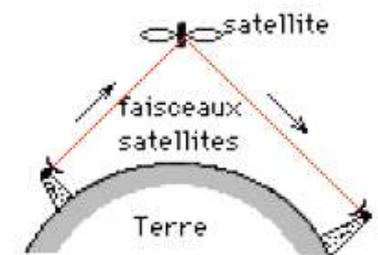
#### a) Les liaisons terrestres (faisceaux hertziens)

Les ondes sont émises d'un relais à l'autre en ligne droite. La courbure de la terre implique une distance maximale entre les relais (tours hertziennes). Les faisceaux hertziens utilisent, de fréquences de 2 à 40 GHz. Ils sont utilisés pour la transmission des chaînes des télévisions et les transmissions par satellite.



#### b) Les transmission par satellite

Le problème de la courbure de la terre est résolu avec l'utilisation des satellites de télécommunication. Les satellites sont situés sur des orbites géostationnaires et ils sont considérés donc comme fixes par rapport à la terre. Ils apportent des communications plus longues par rapport aux liaisons terrestres, mais ils offrent les plus grandes surfaces de couverture.



#### c) Les réseaux sans fils

Ces réseaux locaux sont apparus récemment et permettent de s'affranchir des câbles. Il existe deux catégories de réseaux : réseaux à ondes lumineuses (laser) et réseaux à rayons infrarouges. Ces deux transmissions sont entièrement numériques et à faisceaux très directs.

### 3.3 Caractéristiques des supports de transmission

Quelle que soit la nature du support, le terme signal désigne le courant, la lumière ou l'onde électromagnétique transmis. Certaines caractéristiques physiques (la bande passante, la sensibilité aux bruits, les limites des débits possibles) des supports en perturbent la transmission. La connaissance de ses caractéristiques est donc nécessaire pour fabriquer des bons signaux.

#### 3.3.1 La bande passante

La bande passante (BP ou  $B$ ) est un ensemble des fréquences pouvant être transmises sur le canal, par exemple la ligne de téléphone a une bande passante de 3100 Hz,

#### 3.3.2 Le bruit

Diverses sources de bruit peuvent perturber les signaux : foudre, orages pour le milieu aérien, champs électromagnétiques dans des ateliers pour les supports métalliques... .

La quantité de bruit (SNR en anglais signal to noise ratio) est le rapport de la puissance du signal transmis à la puissance du bruit :  $SNR (dB) = 10 \log_{10} (P_S/P_N)$

#### 3.3.3 La capacité

La capacité d'un support de transmission mesure la quantité d'informations transportée par unité de temps. Le théorème de Shannon donne une borne maximale de cette capacité, notée CapMax et exprimée en bits par seconde :  $CapMax = C = BP \log_2 (1 + P_S/P_N)$

où la base 2 du logarithme sert à exprimer la quantité d'informations en bits. Exemple : sur une liaison téléphonique dont la bande passante a une largeur de 3100 Hz et avec un SNR = 32 dB, on obtient CapMax = 33000 bit/s.

#### 3.3.4 L'affaiblissement

Au cours de la propagation d'une impulsion (électromagnétique ou lumineuse) dans un support de transmission, elle subit une atténuation qui caractérise l'affaiblissement du signal au cours de sa propagation. Elle se calcule de la relation suivante :  $P_s = P_e \exp(-\alpha d)$ , où  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation linéique s'exprime en Neper/km,  $d$  la longueur de la fibre et  $P_e$  et  $P_s$  les puissances à l'entrée et à la sortie du support.

## 4. Principe d'une liaison de données

Une liaison de données est un canal physique capable de transmettre des bits, raccordant 2 ou N stations et leur permettant d'échanger de l'information, de fournir les services nécessaires pour contrôler le flux de données afin d'éviter la saturation du récepteur et de contrôler la correction de la transmission des données. La liaison peut être classifiée en trois modes :

### 4.1 Selon l'organisation des échanges

#### 4.1.1 Liaison simplex

L'une des stations émet et l'autre reçoit, c-à-d les données circulent dans un seul sens par exemple de l'ordinateur vers l'imprimante, de la souris vers l'ordinateur de la télécommande vers la télévision, les émissions radio et télévision, ... .

#### 4.1.2 Liaison semi-duplex

(half duplex): la communication est unidirectionnelle, mais le sens de transmission change alternativement: une station émet, l'autre reçoit réciproquement.

#### 4.1.3 Liaison duplex (full duplex)

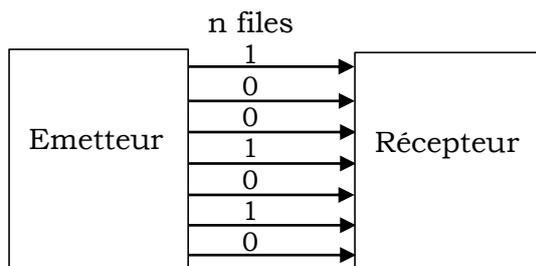
Les deux stations peuvent émettre et recevoir simultanément (mais pas le seul). Ainsi, chaque extrémité de la ligne peut émettre et recevoir en même temps.

### 4.2. Selon le mode d'émission des bits

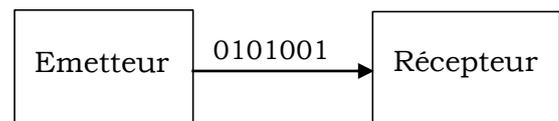
#### 4.2.1 Liaison parallèle

C'est la transmission simultanée de N bits, sur N voies différents où chaque bit est envoyé sur une ligne physique avec une fréquence différente. Cette liaison peut est employée entre des périphériques proches (ordinateur et imprimante).

**4.2.2 Liaison série :** Les données sont envoyées bit par bit sur la voie de transmission.



Liaison parallèle



Liaison série

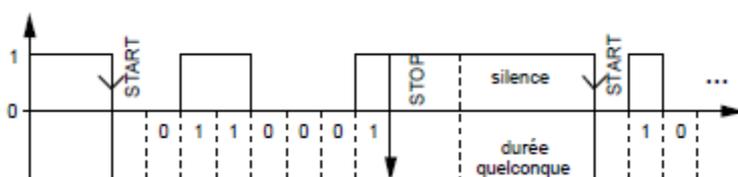
### 4.3. Selon le mode d'asservissement des horloges

#### 4.3.1 Liaison asynchrone

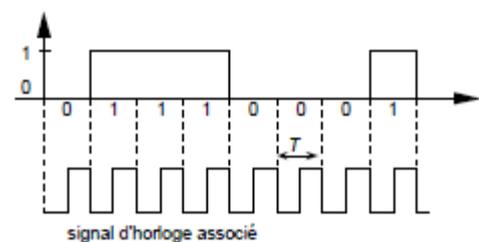
Elle consiste la transmission d'une succession de trains de symboles binaires de blocs de bits courts avec une durée indéfinie entre l'envoi de deux blocs consécutifs. Un bit START correspond à un état actif 0 annonce le début du bloc et un à deux bits STOP correspond à un état inactif 1 annoncent la fin du bloc il permet de s'assurer que la ligne revient bien au repos à la fin du caractère permettant une reconnaissance du caractère. Une telle transmission est simple mais elle présente un allongement du délai de transmission : pour chaque caractère, il faut transmettre au moins deux bits supplémentaires.

#### 4.3.2 Liaison synchrone

Les bits sont envoyés de façon successive sans séparation entre les caractères. Cette liaison a l'inconvénient de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. C'est pourquoi chaque envoi de données doit se faire sur une période assez long pour que le récepteur la distingue. Cette transmission nécessite un fil d'horloge. Les transmissions synchrones sont utilisées pour acheminer des volumes importants d'information (transfert de fichiers par exemple).



Liaison asynchrone Liaison synchrone



## **Chapitre 2 : Transmission de données**

### **1. Introduction**

La transmission de données désigne le transport d'information, d'un endroit à un autre, par un moyen physique. Historiquement, cela se faisait par une chaîne de feux puis des sémaphores, puis un courrier papier, ensuite le Morse sur des fils en cuivre. Dans le vocabulaire informatique, la transmission de données signifie l'envoi de flux de bits ou d'octets d'un endroit à un autre en utilisant des technologies, comme le fil de cuivre, la fibre optique, , les ondes radio, la lumière infrarouge... .

### **2. Modes d'exploitation (sens d'information)**

Le transfert d'informations entre deux systèmes (émetteur/récepteur) s'effectue, en fonction des besoins et des caractéristiques des éléments, suivant trois modes d'exploitation de la liaison.

#### **2.1 Le mode simplex**

La communication simplex est un mode de communication unidirectionnel, les données sont transmises dans un seul sens (figure 2.1). Ce mode est utilisé quand il n'est pas nécessaire pour l'émetteur d'obtenir une réponse de la part du récepteur, par exemple la télécommande de la télévision vers la télévision, l'ordinateur vers l'imprimante, la souris vers l'ordinateur, ... .Le mode simplex est aussi un mode de communication utilisé pour la diffusion, c'est à dire lorsqu'un même émetteur transmet simultanément à de nombreux récepteurs par exemple la liaison entre un émetteur de télévision et les postes récepteurs. Ce mode est retenue car il simplifie la conception du système et en réduit les coûts.

#### **2.2 Le mode semi-duplex (half-duplex)**

Dans ce mode les deux systèmes interconnectés émettent et de reçoivent chacun à leur tour (figure 2.1). La transmission est alors possible dans les deux sens mais non simultanément on dit que l'exploitation est en mode bidirectionnel à l'alternat par exemple le télégraphe Morse, le talkie/walkie, ... . Ce type de liaison est utilisé lorsque le support physique est commun aux deux sens de transmission et ne possède pas une largeur de bande suffisante pour permettre des liaisons bidirectionnelles simultanées. L'avantage de ce mode est qu'il réduit par deux le nombre de canaux de communication et utilise la capacité totale de la ligne. Par contre, il impose que les deux systèmes communicants soient en mesure de déterminer qui a le tour. De plus, un délai supplémentaire est induit lors du basculement du sens de communication.

#### **2.3 Le mode duplex**

Dans ce mode, les données peuvent être émises et reçues simultanément dans les deux sens, l'exploitation est en mode bidirectionnel simultanée (figure 2.1) ce qui signifie que la bande passante est divisée par deux pour chaque sens d'émission si un même support de transmission est utilisé pour les deux transmissions. Ce mode de communication exige que chacun des deux

systèmes soit capable de traiter à la fois des données entrantes et sortantes par exemple le téléphone, disque dur, transmission sur Internet.

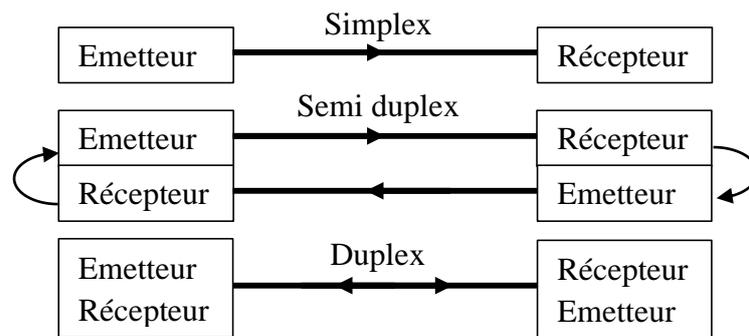


Figure 2.1 Les trois modes d'exploitation

### 3. La bande passante

La principale caractéristique d'une voie de transmission (câble, fibre optique, ...) est sa bande passante (BP en hertz), qui est la bande de fréquences dans laquelle les signaux appliqués à l'entrée du support ont une puissance de sortie supérieure à un seuil donné (après traversée du support de transmission). Le seuil fixé correspond à un rapport déterminé entre la puissance du signal d'entrée et la puissance du signal trouvé à la sortie. En général, on caractérise un support par sa bande passante à -3 dB, c-à-d par la plage de fréquences où la puissance peut d'atténuer en maximum au moitié (figure 2.2).

La bande passante du support de transmission dépend généralement de sa construction, de son épaisseur et sa longueur, exemples la ligne téléphonique a une BP=[300, 3400Hz] = 3100Hz, câble coaxial utilisé dans les réseaux locaux BP=[300 à 400 MHz], ... .

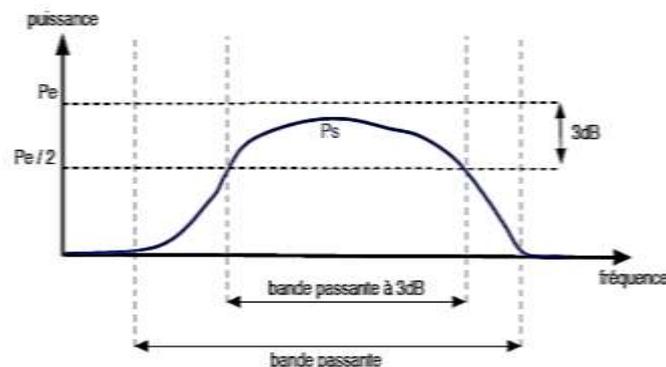


Figure 2.2 Notion de bande passante

### 4. Les différentes bandes de fréquences

Le spectre des fréquences radioélectriques est divisé en neuf bandes conformément au règlement des radiocommunications de l'U.I.T. (Union Internationale des Télécommunications).

Bande	Désignation	Caractéristique de propagation	Utilisateurs
3-30kHz	Très basse fréquence (VLF)	Ondes de sol, faible atténuation jour et nuit	Radionavigation Sous-marins, Grande distances
30-300kHz	Basse fréquence (LF)	Ondes de sol, faible atténuation le jour	Navigation, Marine grande distance, Radio AM
300kHz-3MHz	Moyenne fréquence (MF)	Ondes de sol, faible atténuation la nuit	Radio marine
3-30MHz	Haute fréquence (HF)	Propagation ionosphérique, atténuation variable jour/nuit	Militaires, Avion, Bateaux, Grandes distances, Radioamateurs
30-300MHz	Très haute fréquence (VHF)	Pratiquement en vue directe	TV VHF, Radio FM, Contrôle aérienne, Téléphone sans fil
0.3-3GHz	ultra haute fréquence (UHF)	Vue directe	TV UHT, GPS, GSM, Radars, fours à micro-ondes,
3-30GHz	Super haute fréquence (SHF)	Vue directe	Bluetooth, Wifi, Satellites , Radars
30-300GHz	Extrêmement haute fréquence (EHF)		Satellites
300-3000GHz	Téra hertz		

## 5. La Modulation numérique

Les techniques de modulations sont utilisées pour adapter le signal à la bande transposée. Il existe plusieurs manières dont une porteuse analogique peut être modulée pour représenter des données numériques: la modulation par saut d'amplitude, la modulation par saut de fréquence; et la modulation par saut de phase.

### 5.1 La modulation par saut d'amplitude

Dans la modulation par saut d'amplitude (ASK : Amplitude Shift Keying), l'amplitude de la porteuse est modifiée de manière à coder, les données. Par exemple, une amplitude élevée peut représenter un '1' binaire, et une amplitude basse un '0' binaire. La figure 2.3 montre un exemple de porteuse modulée en amplitude. Cette modulation est sensible aux bruits et n'est pas une technique de modulation très efficace pour les réseaux informatiques, c'est cependant celle qui est utilisé pour transmettre des données numériques sur fibre optique.

### 5.2 La modulation par saut de fréquence

La modulation par saut de fréquence (en anglais FSK, Frequency Shift Keying) consiste à modifier la fréquence de la porteuse pour représenter les données. Par exemple, on associe une fréquence  $f_0$  pour un '0' binaire et la fréquence  $f_1$  pour un '1' binaire. La figure 2.3 montre un exemple de porteuse modulé en fréquence avec  $f_1 = 2 f_0$ .

### 5.3 La modulation par saut de phase

Dans la modulation par saut de phase (PSK = Phase Shift Keying) c'est la phase de la porteuse qui est modifié de manière à représenter les données numériques. Cette modulation permet d'obtenir des vitesses de transmission plus élevées que la modulation FSK.

## 5.4 Combinaison des différentes modulations

Pour obtenir des vitesses de transmission encore plus élevées ; il est possible de combiner les différents types de modulation. Dans les communications numériques, on utilise la modulation d'amplitude et la modulation de phase d'une manière qu'elles dépendent l'une de l'autre: le signal à émettre (qui est complexe) est séparé en deux composants, I ("In-phase") et Q ("quadrature"), qui correspondent aux parties réelle et imaginaire du signal. Ce procédé apporte une grande fiabilité, car il permet de traiter l'information avec une possibilité de codage efficace vis-à-vis du bruit et autorise l'exploitation de rapidités plus élevées.

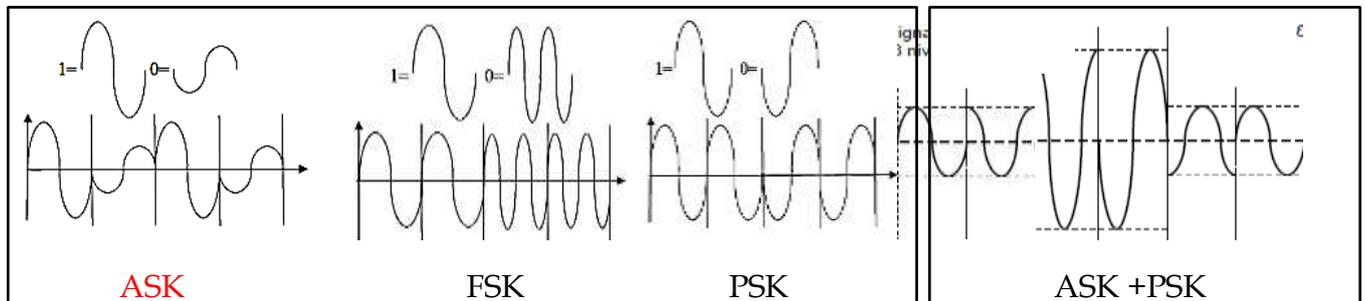


Figure 2.3 Types de modulation numérique

## 6. La valence

Le codage associe une valeur physique (exemple signal électrique) à une valeur logique (un signal binaire). La valence notée  $V$  est le nombre d'états significatifs possibles d'un signal transmis. En pratique, la valence est souvent choisie de sorte que ce soit une puissance de 2,  $V=2^n$  (2, 4, 8, 16, etc) où 'n' est le nombre de bits nécessaire pour écrire ces états en binaire  $n = \log_2(V)$ . Pour coder 2 états on a besoin d'un bit pour chaque état (0 et 1), 2 bits permettent de coder 4 états (00, 01, 10 et 11), 3 bits permettent de coder 8 états (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 et 111), ..., n bits permettent de coder  $2^n$  états.

## 7. La rapidité de modulation

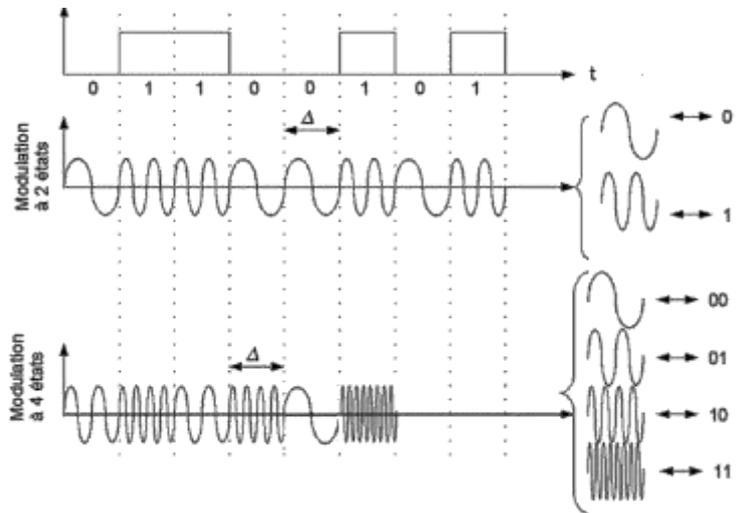
La modulation consiste à faire correspondre à un ensemble de symboles binaires, un ensemble de valeurs représentatives d'une combinaison binaire (amplitude, fréquence ou phase), durant un intervalle de temps élémentaire. L'intervalle de modulation (ou temps élémentaires)  $\Delta$  (en seconde) correspond à la durée d'un état de modulation.

La rapidité de modulation  $R$  (où la vitesse de modulation) représente le nombre des intervalles de modulation transmis en une seconde. Elle se traduit par l'équation:  $R= 1/\Delta$ .

L'unité de mesure de la rapidité de modulation  $R$  est le baud (du nom de Baudot, inventeur du code télégraphique).

### Exemple

- Pour des modulations simples (des signaux de valence 2), chaque intervalle  $\Delta$  transporte 1 bit.
- Pour des modulations des signaux de valence 4, chaque intervalle  $\Delta$  transporte 2 bits.



**La rapidité de modulation maximale**

Dans une ligne de transmission le signal peut subir plusieurs difficultés: atténuation (distorsion d'amplitude), retard (distorsion de phase), étalement du signal, interférence de symboles (la fin d'une impulsion transmise peut se confondre avec le début de la suivante), ... . Il existe une relation entre le nombre maximal de symboles que le système peut admettre, dite la rapidité maximale, et la bande passante de celui-ci donné par la formule de Nyquist suivante:  $R_{max} = 2 BP$ .

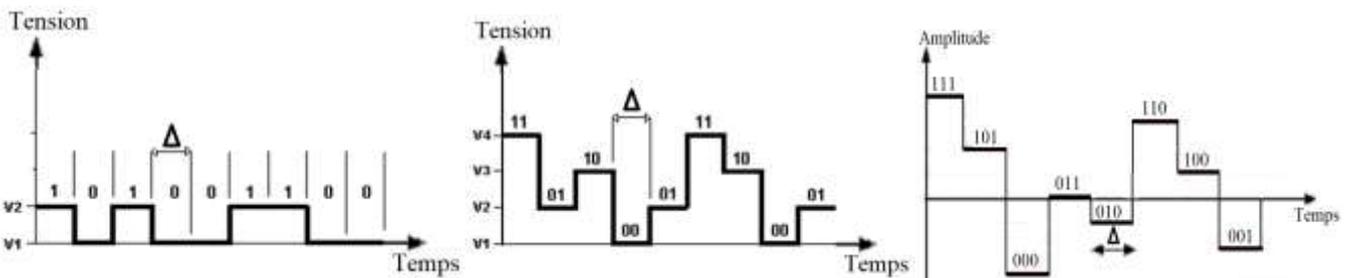
**8. Le débit binaire**

Lors de la transmission d'un signal numérique, un paramètre important pour le caractériser est la quantité de données qu'il véhicule par unité de temps. On définit alors le débit binaire D, qui correspond au nombre de bits effectivement transmis par seconde. Il peut s'exprimer (en bit par seconde (bit/s ou bps)) par la relation :  $D = \frac{\log_2(V)}{\Delta} = R \log_2(V) = nR$

Les câbles coaxiaux ont des débits voisins de 100 Mbit/s et les fibres optiques 100 Gbits/s.

Exemple 1: Calculer les débits binaires d'une ligne téléphonique pour une rapidité de modulation R=2400bauds en codant 4 bits par signal, six bits par signal et 12 bits par signal.

Exemple 2: Calculer les rapidités de modulation des signaux ci-dessous et leurs débits binaires pour un temps élémentaire Δ=1ms et trouver la séquence binaire pour chaque signal.



**Le débit maximum** : Le débit maximum d'un canal de transmission est le débit que l'on peut passer sur la ligne. Il est donné par le théorème de Nyquist pour un canal parfait suivant la relation  $D_{max} = 2BP \log_2(V)$  et pour un canal bruité, il est donné par la relation de Shannon :

$$D_{max} = 2BP \log_2 \left( \sqrt{1 + \frac{P_S}{P_B}} \right) = BP \log_2 \left( 1 + \frac{P_S}{P_B} \right)$$

où  $P_S$  et  $P_B$  les puissances du signal et du bruit.

Exemple : Calculer le débit maximum d'une ligne téléphonique [300 , 3400 Hz] admettant un rapport signal sur bruit de 30 dB.

## CHAPITRE 3 : MODEMS ET INTERFACES

### 1. INTRODUCTION

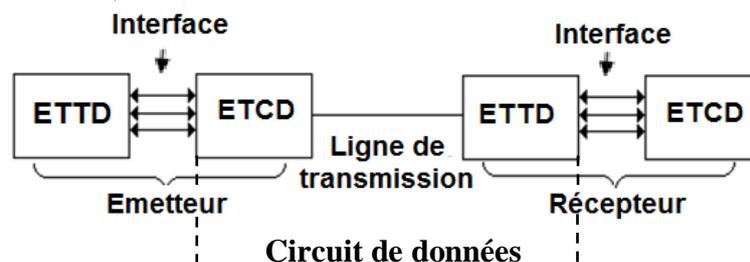
Selon les techniques de transmission utilisées, un équipement spécifique est placé à chaque extrémité du support de transmission, soit un modem (modulateur-démodulateur) soit un codec (codeur-décodeur). Cet équipement assure la fabrication des signaux en émission et leur récupération en réception. Le support de transmission et les deux modems placés à chacune de ses extrémités constituent un ensemble appelé circuit de données, comme montre la figure ci-dessous.

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) et l'UIT ont attribué des appellations communes normalisées au modem et à l'équipement qui émet ou reçoit les données

**L'ETTD** (Equipement Terminal de Traitement des Données) en anglais DTE (Data Terminal Equipment): est l'équipement qui assure la saisie, le traitement et le stockage de l'information, il intègre un contrôleur de communication qui peut être un ordinateur, un terminal, une imprimante, ... .

**L'ETCD** (Equipement de Terminal de Circuit de Données) en anglais DCE (Data Circuit Terminating Equipment): est un équipement spécifique chargé d'adapter les données à transmettre au support de transmission permettant ainsi la conversion et le codage des signaux (transformation des bits en signaux et réciproquement). Il peut être un modem, un multiplexeur, un concentrateur, un codec ou adaptateur (pseudo-modem).

**L'interface:** est la jonction entre l'ETCD et l'ETTD. Elle permet à l'ETTD de gérer l'ETCD afin d'assurer le déroulement des communications (établissement, libération et initialisation de la transmission,...).



### 2. LE MODEM

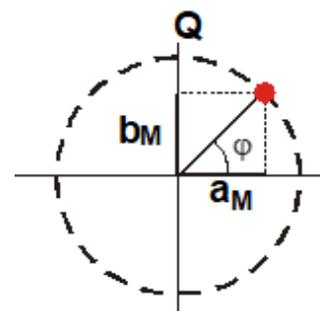
#### 2.1 Description

**Modem** abréviation de **Mod**ulateur **DE**Modulateur est un convertisseur digital/analogique ou adaptateur digital/digital destiné à faire communiquer des machines numériques entre elles à travers un réseau analogique (réseau téléphonique, réseau électrique, réseaux radios...). En automatisme industriel, on parle de modems pour les machines (machines d'emballage, chaudières collectives, stations d'épuration ...). Les modems ont été utilisés pour la première fois dans le système de défense aérien en 1950. Après 1990, de nombreux types de modems sont apparues : ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Services), GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service), Wifi (Wireless Fidelity), Wimax (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

Toutes les catégories de modems servent bien souvent à accéder à internet. Pour émettre les données, le modem reçoit l'information binaire à transmettre et la convertit en un signal analogique (module les informations numériques en ondes analogiques), dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission. Inversement, en réception, le modem extrait la suite des données binaires du signal reçu (démodule les données numériques).

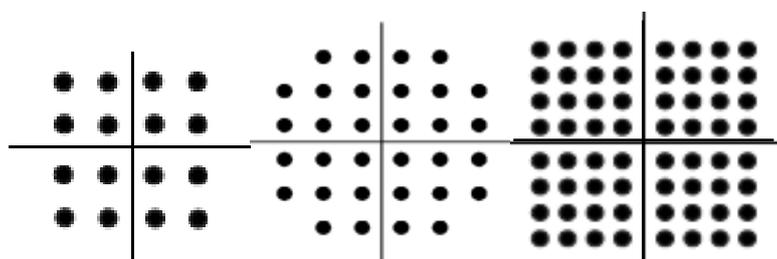
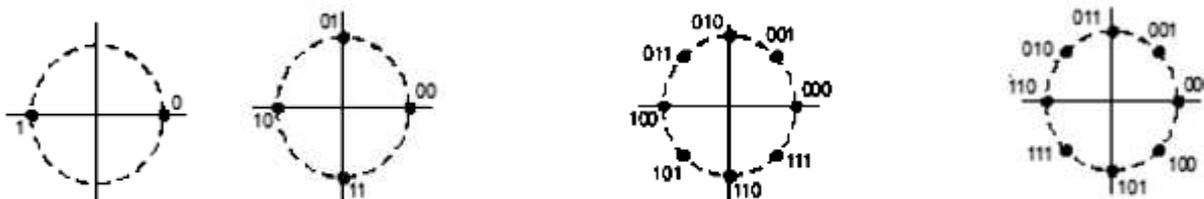
### 2.2 Diagramme de Constellation

Afin de transmettre de plus en plus d'informations donc augmenter le débit binaire, les modulations dites M-aires (à M niveaux) (M-QAM ou M-PSK) sont utilisées, on regroupe n bits successifs en mots de n bits appelés symboles qui peuvent être étudiés sous forme graphique dite diagramme de constellation. Le diagramme de constellation est une représentation graphique (appelée I-Q), dans le plan complexe, des symboles numériques reçus au cours d'une certaine période de temps par des points, appelés points de constellation. Chaque point est généré par deux composantes: une composante réelle  $a_M$  (en phase (notée I) dans les axes des abscisses) et une composante imaginaire  $b_M$  (en quadrature (notée Q) dans les axes des ordonnées).



Chaque type de modulation est représenté différemment. Un signal 16QAM est représenté dans un quadrillage avec 16 zones différentes, un signal 64QAM est représenté dans un quadrillage avec 64 zones,...

#### Exemple



### 2.3 Caractéristiques d'un modem

Les principales caractéristiques d'un modem sont:

- La vitesse de transmission ou débit binaire : il existe des modems travaillant à 150, 300, 600, 1200 bit/s, 4.8, 9.6, 14.4, 28.8, et 33,6 kbit/s et depuis plusieurs années, la norme 56kbit/s est le standard.

- Le mode d'exploitation: simplex, half duplex ou full duplex
- Le mode de transmission: synchrone ou asynchrone ou les deux modes
- La rapidité de modulation qui permet de choisir, pour un débit donné, le modem le mieux adapté au support sur lequel il sera utilisé
- Le support de transmission pour lequel il est prévu: réseau téléphonique, lignes 2 ou 4 fils
- Le type de modulation
- Le mode de couplage à la ligne: électrique ou acoustique.
- Les procédures de correction d'erreurs et de compression de données intégrées
- Type de l'interface physique avec l'ETTD (prises 25 points, 9 points, ...),

## 2.4 Les normes des modems

L'UIT a émis un certain nombre d'avis concernant le fonctionnement des modems. Ces avis spécifient les conditions de fonctionnement des appareils: vitesses de transmission autorisées, types de modulation, systèmes de compression et/ou de détection d'erreurs éventuelles. Ils constituent en réalité des normes qui sont respectées par de nombreux constructeurs. Ci-après quelques normes importantes.

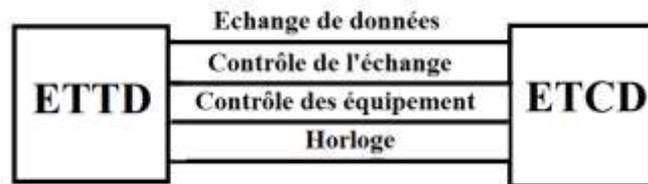
Norme	Année	Débit et rapidité	Mode d'exploitation	Types de la modulation	Bande de fréquence	Mode de transmission
V21	1962	300 bit/s 300 bauds	Duplex	FSK	980 et 1180Hz 1650 et 1850	Asynchrone
V23	1964	1200bit/s 1200bauds	Duplex	FSK	1700 Hz $\pm$ 400Hz 420Hz $\pm$ 30Hz	Asynchrone Synchrone
V26	1968	2400 bit/s 1200 bauds	Duplex	DPH4	1800 Hz	Synchrone
V27	1972	4800 bit/s 1600 bauds	Duplex ou Semi- duplex	DPH8	1800 Hz	Synchrone
V29	1976	9600 bit/s 2400 bauds	Duplex	MAQ16	1700 $\pm$ 1 Hz	Synchrone
V22	1980	1200 bit/s 600 bauds	Duplex	DPH4	1200Hz 2400Hz	Synchrone
V32	1984	9600 bit/s 2400 bauds	Duplex	MAQ4, 16, 32	1800Hz	Synchrone
V33	1988	14400 bit/s 2400 bauds	Duplex	MAQ64-128	1800Hz	Synchrone
V32bis	1991	14400 bit/s 2400 bauds	Duplex	MAQ128	1800Hz	Synchrone
V90	1998	56kbit/s en aval 33.6kbit/s en amont	Duplex	PCM128etQA M128		Synchrone
V92	2000	56kbit/s en aval 48kbit/s en amont	Duplex	PCM128etQA M128		Synchrone

- FSK : Modulation par déplacement de fréquence(MDF)
- DPH : Modulation de phase différentielle
- MAQ : Modulation combinée de phase et d'amplitude
- QAM : Modulation d'amplitude en quadrature
- PCM : Modulation d'impulsions codées (MIC)
- En aval : Sens serveur vers client ; En amont: Sens client vers serveur

### 3. Les interfaces

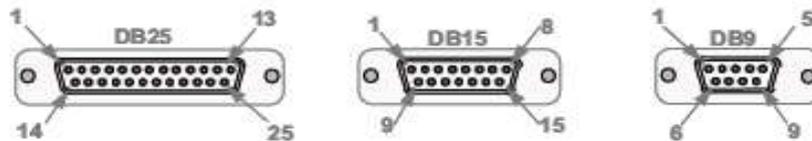
#### 3.1 Définition

L'interface, ou jonction, est le point de raccordement physique entre l'ETTD et l'ETCD. Elle définit un ensemble de règles destinées à assurer la connectivité, le dialogue entre l'ETTD et l'ETCD, la transmission des horloges, le transfert de données et le contrôle de celui-ci.



#### 3.2 Les principales interfaces : Une interface ETTD/ETCD spécifique :

a) **L'interface mécanique** : décrit le connecteur physique comme, la forme du connecteur et le nombre de broches. La figure suivante représente les principaux connecteurs de face utilisés ils sont d'origine Cannon, plus connus sous les appellations de DBXX où XX est le nombre des broches. Ces connecteurs sont de type mâle. Les ETTD sont équipés des connecteurs femelles.



b) **L'interface électrique** : détermine les niveaux de tensions utilisées. Les principaux avis sont: V.28, V.10 (X.26) , V.11 (X.27) et G703.

c) **L'interface fonctionnelle** : un ensemble de circuits destinés à établir la liaison physique. Elle précise les fonctions remplies par telle ou telle broche : le transfert de données, les signaux de commande, les signaux de synchronisation et les masses. L'avis V.24 est la plus ancienne et en même temps la plus utilisée.

d) **L'interface procédurale** : définit les procédures de commande et d'échange.

#### 3.3 Normalisation des interfaces : Les principales normes des interfaces ont été éditées par :

- CCITT( Comité Consultatif International des Téléphones et Télégraphes): Série Vxx (Transmission de données sur le réseau téléphonique) et Série Xxx (Transmission de données sur les réseaux publics), exp : X.21, X.21bis
- EIA (Electronic Industry Association) : Série RSxxx (RS232, RS449, RS422, RS423A...)

Le tableau suivant présente les principales interfaces normalisées et leurs caractéristiques essentielles.

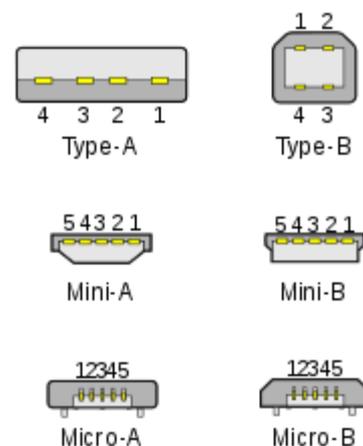
Norme	Mécanique	Electrique	Fonctionnelle	Portée	Débit binaire
-------	-----------	------------	---------------	--------	---------------

V24/RS232	ISO2110 DB25	V28	0: +3 à +25V 1: -3 à -25V	V24	12m	2.2 à 19.2 kbit/s
V35	ISO2593 DB34	V11/V10 RS422/RS485		V24 RS449	15m 10m	48 à 64 kbit/s 128 à 256 kbit/s
X24/V11	ISO4903 DB15	V11 RS422	-0: +0.3 à +6V 1: -0.3 à -6V	X21	100m 50m	64 à 1024 kbit/s 1920 kbit/s
G703	ETSI 300.116 DB9	G.703		G703	300m	2048kbit/s

### 3.4 L'interface USB :

Depuis 20 ans, on utilise le port série USB (Universal Serial Bus) dont la version la plus rapide supporte jusqu'à 480Mbit/s. Le port USB contient quatre circuits: un pour l'alimentation, deux pour les données (un par sens de transmission) et une terre de protection.

Presque tous les appareils (scanners, imprimantes, appareils photo...) sont dotés d'un tel port. Cette interface permet de brancher ou de débrancher le modem à chaud sans avoir à redémarrer l'ordinateur.



### 4. Nomenclatures des circuits-

La nomenclature des circuits définit les caractéristiques fonctionnelles de la jonction (connecteur) entre l'ETTD et l'ETCD. Cette jonction est composée d'un ensemble de circuits ayant une fonction précise exprimé en abrégiation normalisé. A chaque broche correspond un circuit de jonction , identifié par un numéro, appelé numéro de circuit, et sa fonction. Les numéros sont regroupés en deux séries:

- La série 100, spécifie 39 circuits qui s'appliquent aux transmissions de données synchrones et asynchrones, aux services de transmission de données sur lignes louées à 2 ou à 4 fils en exploitation point à point ou multipoint : Circuits de références : 101et 102 , circuits de transmission 103 et 104 ; circuits pour les contrôles 107,108 et 125 , circuits d'initialisation 105, 106 et 109, circuits pour les horloges , 113, 114 et 115.

N°	Fonction	Abréviation	N°	Fonction	Abréviation
101	Terre de Protection (Protective Ground)	TP (PG)	108	Terminal de Données Prêt (Data Terminal Ready)	TDP (DTR)
102	Terre de Signalisation (Signal Ground)	TS (SG)	109	Détection de la Porteuse (Data Carrier Detect)	DP (DCD)
103	Emission des Données (Send Data)	ED (SD)	111	Sélecteur de Débit Binaire (Data Signal rate Selector)	SDB (DSRS)
104	Réception des Données (Receive Data)	RD (RD)	113	Base de Temps d'Emission (Transmit Clock DTE)	BTE (TC)
105	Demande Pour Emettre (Request To Send)	DPE (RTS)	114	Base de Temps d'Emission (Transmit Clock DCE)	BTE (TC)
106	Prêt A Emettre (Clear To Send)	PAE (CTS)	115	Base de Temps Réception (Receive Clock)	BTR (RC)
107	Poste de Données Prêt (Data Set Ready)	PDP (DTR)	125	Indicateur d' Appel (Ring Indicator)	IA (RI)

- La série 200, pour la gestion de l'appel automatique, a 13 circuits, 201=TS (Terre de Signalisation), 202=DA (Demande d'Appel), 203=LPDO (Ligne Pour Données Occupée), 204=PEC (Poste Eloigné Connecté), 205=AA (Abandon d'Appel), ....

Exemple : L'interface série V24 a été très largement répandue, avec un connecteur parallèle CCITT V24 (RS232C) le DB25 (25 broches) puis un connecteur série simplifié à 9 broches (DB9)

RS232C	TD	RD	RTS	CTS	DSR	SG	CD	DTR	RI	PG
CCITT V24	ED	RD	DPE	PAE	PDP	TS	DP	TDP	IA	TP
N° du circuit	103	104	105	106	107	102	109	108	125	101
N° de Broche DB9	3	2	7	8	6	5	1	4	9	
N° de Broche DB25	2	3	4	5	6	7	8	20	22	1

**5. Etablissement d'une liaison entre deux systèmes**

L'interface ETDD/ETCD véhicule les signaux de contrôle et les données transmises. La procédure d'établissement de la liaison dépend du type de relation : liaison spécialisée, réseau téléphonique commuté avec ou non appel automatique et réponse automatique, liaison synchrone ou asynchrone, ... . La transmission se fait selon 3 phases:

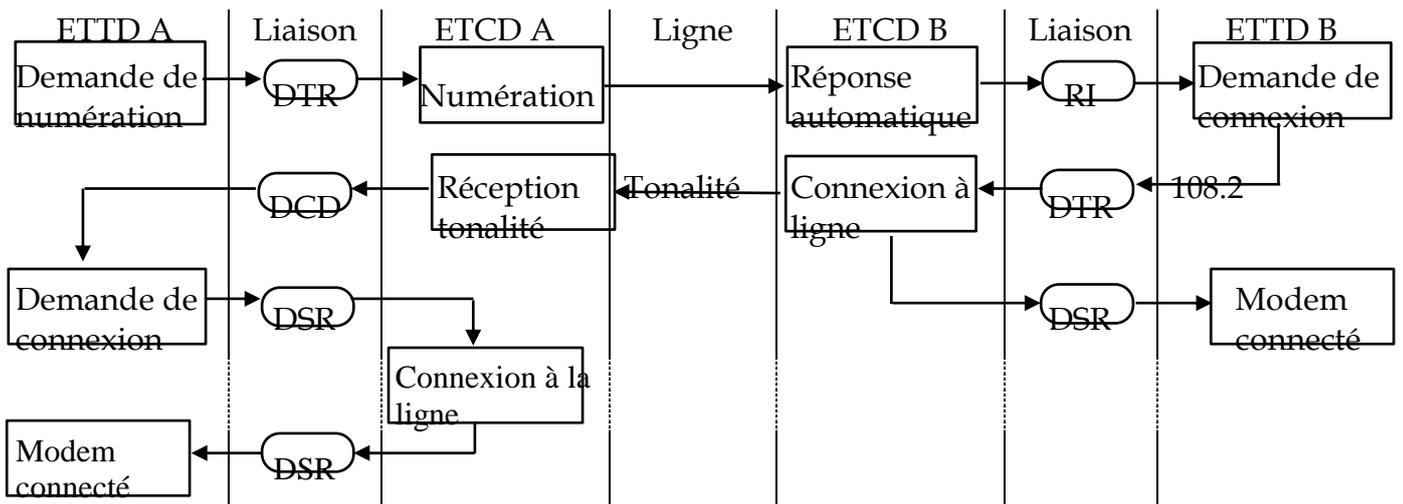
Phase 1 : Établissement de la connexion entre les deux systèmes

Phase 2 : Initialisation de la liaison

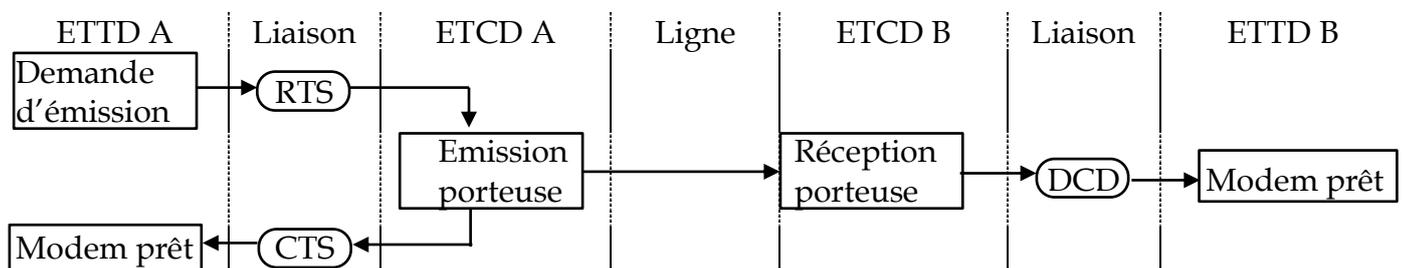
Phase 3 : Transmission des données

La figure suivante représente un exemple de connexion entre deux modems (A et B). La liaison est full duplex et en mode asynchrone (pas de circuit d'horloge). Les circuits participant à la communication sont: DTR (108.2) et DSR (107) pour la connexion de ligne, RTS (105) et CTS (106) pour la validation de l'émission, DCD (109) pour la validation de porteuse, RI (125) pour signaler un appel reçu par l'ETCD et TD (103) et RD (104) pour l'échange de données. Les différentes phases de l'établissement de cette liaison entre le système A et le système B sont:

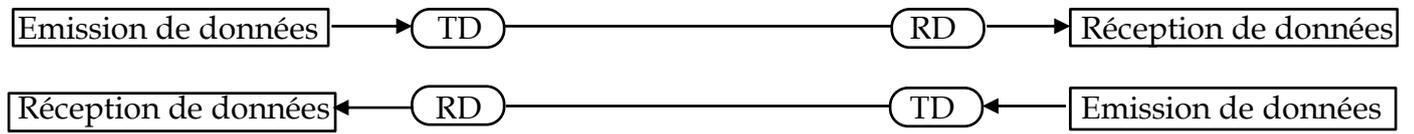
**Phase 1 : Établissement de la connexion entre les deux systèmes**



**Phase 2 : Initialisation de la liaison**



**Phase 3 : Transmission de données**



## CHAPITRE 4 PROTECTION CONTRE LES ERREURS

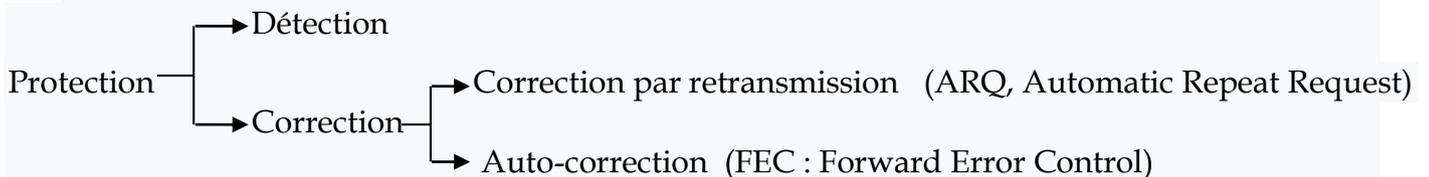
### 1. Les erreurs de transmissions

A l'émission, l'information (constituée d'une séquence binaire) est codée sous forme d'un signal et transmise au récepteur à travers le support de transmission. Si la transmission était parfaite, le signal reçu serait tout à fait identique au signal émis, mais le signal peut subir diverses déformations et peut-être perturber par le bruit. Les perturbations peuvent être de plusieurs causes: bruit aléatoire (perturbations électromagnétiques (orages)), la diaphonie (bruit en provenance de canaux voisins), bruit thermique (dû aux équipements de raccordement et des composants électroniques), ... et de la qualité de la ligne de transmission: atténuation (câbles trop longs), réflexion ...

### 2. Stratégies de protection contre les erreurs de transmission

Deux types de protections existent :

- Au niveau du support en le fiabilisant de plus en plus par exemple le développement de la fibre optique et de paires torsadés, blindés... a permis une plus grande fiabilité de la transmission.
- Au niveau logique en mettant en place des mécanismes de détection et de correction d'erreurs, qui sont des algorithmes de reconnaissance



ARQ : Automatic Repeat Request= Demande de répétition automatique:

- Stop & Wait ARQ: le transmetteur envoie un symbole et attend un acquittement positif (ACK) ou négatif (NAK) du récepteur. Dans le premier cas, le transmetteur poursuit la transmission, et dans le second cas, il réémet le même symbole jusqu'à recevoir un ACK.
- Continuous ARQ : l'algorithme est identique, mais le transmetteur n'attend pas ce qui permet de gagner du temps. Les contrôleurs de communication sont, par contre, plus complexes.

FEC : Forward Error Control (Contrôle d'erreur avant) : La détection et la correction des erreurs sont réalisées à la réception en utilisant les éléments de protection introduits à l'émission.

### 3. Le taux d'erreurs

#### 3.1 Le taux d'erreur binaire

En Pratique, la probabilité d'erreur est estimée par une mesure du Taux d'Erreur Binaire (TEB ou BER pour *Bit Error Rate*). Le taux d'erreur binaire est en général le facteur principal de la qualité d'une liaison numérique, il détermine le nombre d'erreurs apparues avant la modulation et juste après la démodulation. Le taux d'erreur par élément binaire est donné par :  $BER =$

$\frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bit transmis}}$  et s'exprime en puissance négative, exemples :  $10^{-4}$  le téléphone sans fil,  $10^{-5}$  le RTC (réseau téléphonique commuté),  $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  câble coaxial,  $10^{-9}$  paire torsadée,  $10^{-10}$  à  $10^{-12}$  les fibres optiques.

**Exemple :** Soit l'information émise 011001001001100100101001010 et l'information après décodage par le récepteur est 011001101100101101000010, calculer le taux d'erreurs.

### 3.2 Le rapport signal à bruit par bit

Le rapport signal au bruit est directement relié à la distorsion du signal. Le rapport signal à bruit, pour les transmissions analogiques est très élevé (plusieurs dizaines de dB), mais beaucoup plus faible pour des communications numériques. Ainsi, le rapport signal sur bruit n'est pas la meilleure métrique pour qualifier la qualité d'un signal numérique. On utilise, le rapport signal à bruit normalisé appelé rapport signal à bruit par bit noter  $E_b/N_0$ . C'est le rapport entre l'énergie véhiculée par un bit ( $E_b$ ) et la densité spectrale du bruit ( $N_0$ ).

$$SNR \text{ par bit} = \rho = \frac{\text{Energie véhiculée par un bit}}{\text{Densité spectrale en puissance du bruit}} = \frac{E_b(Ws/bit)}{N_0(W/Hz)}$$

La puissance moyenne du signal est donnée par :  $P_s = E_b D$  ( $D$  le débit binaire) et la puissance du bruit dans la bande  $B$  et donnée par  $P_b = N_0 B$ . Alors le rapport signal à bruit et le rapport signal à bruit par bit sont reliés par l'équation :

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_b} = \frac{E_b D}{N_0 B} = \rho \frac{D}{B}$$

### 4. La détection des erreurs

On appelle détection des erreurs le mécanisme mis en œuvre par le système destinataire pour vérifier la validité des données reçues. La détection d'erreur repose sur l'introduction d'une certaine redondance dans l'information transmise. Quatre techniques peuvent être mises en œuvre pour détecter et éventuellement corriger les erreurs :

- **La détection par écho :** le récepteur renvoie à l'émetteur le message reçu sous forme d'écho, si le message est différent de celui qu'il a émis, l'émetteur retransmet le message. Cette technique est utilisée dans les terminaux asynchrones (Telnet, Minitel ...).
- **La détection par répétition :** cette approche consiste à dupliquer (répéter) le message à transmettre donc chaque message émis est suivi de sa réplique. Par exemple, pour envoyer 11100010, on transmet 1110001011100010. A la réception on cherche les différences entre la première et la seconde moitié du message. Par contre, il est impossible de corriger une erreur détectée: le bit erroné est différent dans les deux copies, et rien ne permet de dire lequel est le bon. Pour remédier à ce problème, le récepteur demande une retransmission du message. Dans ce cas, un bit a soit la même valeur dans toutes les copies, ou la même valeur dans deux d'entre elles. Le bit correct est probablement celui qui apparaît en deux exemplaires, on peut cette fois corriger l'erreur.

Le code de répétition est simple et présente un coût en calcul faible, mais il présente aussi de nombreux inconvénients, comme certaines erreurs peuvent ne pas être détectées, certaines erreurs détectées ne peuvent pas être corrigées, ou être mal corrigées et la correction nécessite plus de redondance que la détection d'erreurs c.-à-d. un coût en taille élevé.

- **La détection d'erreur par clé calculée:** une information supplémentaire (clé) déduite des informations transmises est ajoutée à celles-ci. En réception, le récepteur recalcule la clé, si le résultat obtenu correspond à la clé reçue, les données sont réputées exactes, sinon le récepteur demande la retransmission.

- **La détection et correction d'erreur par un code** : cette technique consiste à substituer aux caractères à transmettre, une combinaison binaire différente du codage de base (code auto-correcteur).

#### 4.1 La détection d'erreur par clé calculé

Dans les systèmes à clé calculée, une séquence de contrôle (CTL1) déduite d'une opération mathématique appliquée au message à émettre est envoyée avec le message. Le récepteur effectue la même opération. Si le résultat trouvé (CTL2) est identique à la clé calculée par la source (CTL1), le bloc est réputé exact, dans le cas contraire le bloc est rejeté

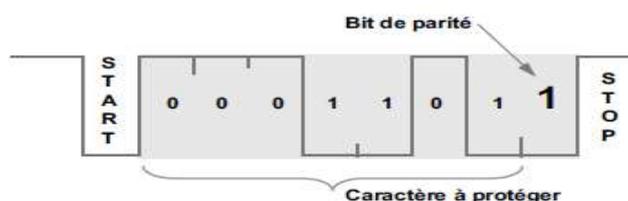
##### 4.1.1 La détection d'erreur par bit de parité

Le contrôle de parité a été le premier système mis en place et reste l'un des plus simple. Son principe est basé sur l'utilisation d'un bit supplémentaire, appelé bit de parité (pair ou impair), généré à l'émission et testé à la réception. Ce code est particulièrement utilisé dans les modems et pour les transmissions série (norme V24)

Bit de parité	Parité paire	Parité impaire
1	la somme binaire des bits de 1 du message est impaire	la somme binaire des bits de 1 du message est paire
0	la somme binaire des bits de 1 du message est paire	la somme binaire des bits de 1 du message est impaire

##### a) Code de parité simple VRC

Ce contrôle de parité, connu sous le nom VRC de (Vertical Redundancy Check, vérification par redondance verticale) consiste à ajouter à chaque caractère un bit de parité dit parité verticale ou VRC, Avec ce code on peut protéger autant de symboles que l'on veut avec un symbole. Mais il possède l'inconvénient majeur de détecter et corriger seulement les erreurs simples, les problèmes de localisation de l'erreur et de risque d'erreurs multiples qui se compensent et ne permet de détecter que les erreurs portant sur un nombre impair de bits. Elle est utilisée que dans les transmissions asynchrones.



**Exemple** : Pour transmettre la chaîne de caractères IUT, on code chaque lettre en ASCII, puis on ajoute le VRC comme suit

Lettre	I	U	T
ASCII	1001001	1010101	1010100
VRC pair	$\sum$ bits 1 est impaire on ajoute 1	$\sum$ bits 1 est paire on ajoute 0	$\sum$ bits 1 est impaire on ajoute 1
	.....	.....	.....

VRC impair	$\sum$ bits 1 est impaire on ajoute 0	$\sum$ bits 1 est paire on ajoute 1	$\sum$ bits 1 est impaire on ajoute 0
------------	---------------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------

Le message envoyé : pour le système à parité paire : .....

**b) Code de parité double**

Dans les transmissions synchrones, les caractères sont envoyés en blocs, la technique du bit de parité VRC est insuffisante, elle doit être complétée par une autre information, le LRC (Longitudinal Redundancy Check vérification par redondance longitudinale). Ce code améliore la détection des erreurs en utilisant les contrôles par parité à deux dimensions VRC + LRC. Son principe est 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 (bloc de caractère). Pour cela à la fin de la trame, le LRC, est ajouté. Le LRC est lui-même protégé par un bit de parité (VRC).

Caractère à transmettre	VRC	Caractère à transmettre	VRC	...	Caractère à transmettre	VRC	LRC	VRC
-------------------------	-----	-------------------------	-----	-----	-------------------------	-----	-----	-----

Pour l'exemple précédant on a :

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

Le message envoyé : pour le système à parité impaire: .....

**4.1.2 Le code contrôle de redondance cyclique**

Le contrôle de redondance cyclique (CRC : Cyclic Redundancy Check) est un code de bloc puissant facile à mettre en œuvre et donne d'excellents résultats, représente la principale méthode de détection d'erreurs utilisée dans les télécommunications et permet la détection des erreurs et les répare aussi. La détection par le code CRC est déterminée par une opération mathématique complexe appliquée au bloc de données à transmettre et se transmet avec celui-ci.

**a) Procédure de la détection :**

- 1) Soit S une chaîne du bloc de n bits à transmettre définie par  $a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1 a_0$  (les  $a_i$  sont 0 ou 1)
- 2) On associe à la chaîne S un polynôme  $P(x)$  de degré  $(n - 1)$  définie à partir des bits de S :  $P(x) = a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} \dots + a_1x + a_0$ .
- 3) Un code CRC est défini par un polynôme fixe, normalisé, prédéfini par le protocole de la liaison et connu par l'émetteur et le récepteur appelé polynôme générateur et noté par  $G(x)$  de degré k
- 4) Le polynôme  $P'(x) = x^k P(x)$  est calculé (équivalent à un décalage de  $P(x)$  de k positions vers la gauche)

5)  $P'(x)$  est divisé par  $G(x)$ , selon les règles de l'arithmétique booléenne, pour donner un reste  $R(x) : P'(x) = G(x) Q(x) + R(x)$  ( $Q(x)$  est le quotient de la division)

### b) Codage à l'émission :

6) Le reste de la division est  $R(x) = r_{k-1}x^{k-1} + r_{k-2}x^{k-2} + \dots + r_1x + r_0$

7) Les  $k$  bits  $r_{k-1} r_{k-2} \dots r_1 r_0$  du  $R(x)$  constituent les bits de CRC

8) L'émetteur transmet au récepteur la séquence de  $n$  bits  $(a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1 a_0)$  suivis des bits de CRC  $(r_{k-1} r_{k-2} \dots r_1 r_0)$

### c) Décodage à la réception :

9) Le récepteur reçoit une séquence binaire (message+ contrôle) soit  $C$  la chaîne de  $m$  bits reçue :  
 $C_{m-1} C_{m-2} \dots C_1 C_0$

10) On associe le polynôme  $C(x)$  à la chaîne  $C$ :  $C(x) = c_{m-1}x^{m-1} + c_{m-2}x^{m-2} + \dots + c_1x + c_0$

11) Le récepteur effectue la division  $C(x)$  par  $G(x)$ . Si le reste de la division  $R'(x) = 0$  alors pas d'erreurs, si  $R'(x) \neq 0$  il y a des erreurs.

**Remarque :** la multiplication est réalisée par un registre à décalage et l'addition avec OU exclusif (XOR)

### d) Exemples :

1) On considère protéger le bloc de données suivant 1010010111 et le polynôme générateur utilisé est  $G(x) = x^4 + x^2 + x + 1$ . Trouver le message envoyé.

2) Une donnée à contrôler avec un polynôme générateur  $G = 11001$ . Si le message reçu correspond au polynôme  $x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^9 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x$ , y-a il des erreurs?

#### - Codage à l'émission :

1. On fait correspondre à la séquence  $S=1010010111$ , le polynôme  $P(x) = x^9 + x^7 + x^4 + x^2 + x + 1$

2. On multiplie  $P(x)$  par  $x^4$  (4 est le degré du  $G(x)$ )

3. Le dividende devient  $P'(x) = x^{13} + x^{11} + x^8 + x^6 + x^5 + x^4$  (la séquence 10100101110000)

4. On effectue la division  $P'(x)/G(x)$

5. Le reste de la division est  $R(x) = x^3 + x^2$ , alors le CRC = 1100

6. Le bloc à transmettre est la séquence de  $P'(x)$  suivie de CRC c-à-d 101001011100**1100**

#### 2) Décodage à la réception :

On reçoit  $x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^9 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x$

7. On effectue la division  $C(x)$  par polynôme générateur  $G(x) = x^4 + x^3 + 1$  ( $G = 11001$ )

8. Le reste de la division est  $R'(x) = x^2 + x + 1$ , alors le CRC' = 0111

9. Le CRC'  $\neq$  0000 alors une erreur de transmission est détectée. le récepteur va signaler qu'il y a erreur

### e) Les polynômes générateurs :

Les polynômes générateurs sont normalisés. Les principaux polynômes employés sont :

CRC-4 : $x^4 + x^2 + x$	CRC-IEEE802 : $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$
	très utilisé dans les réseaux locaux

CRC-12 $x^{12}+x^{11}+x^3+x^2+x+1$	:	CRC-CCITT (V41): $x^{16}+x^{12}+x^5+1$ permet de détecter toutes séquences d'erreurs de longueur égal ou inférieur à 16 bits
CRC-16 : $x^{16}+x^{15}+x^2+1$		CRC-ARPA : $x^{24}+x^{23}+x^{17}+x^{16}+x^{15}+x^{13}+x^{11}+x^{10}+x^9+x^8+x^5+x^3+1$