

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
Direction des ISET
ISET Nabeul**

Cours de :

SYSTEMES DE COMMUNICATION

Enseigné par :

JEBRI Elies

Niveau d'enseignement :

Informatique Industrielle Quatrième Niveau

1999/2002

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. CONCEPTS DE BASE	1
2. NOTION DE PROTOCOLE	3
3. MODELE DE REFERENCE DE L'ISO	4

LIGNES DE TRANSMISSION

1. INTRODUCTION	7
2. CARACTERISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	8
2.1 BANDE PASSANTE	8
2.2 CAPACITE	9
2.3 TEMPS DE PROPAGATION ET TEMPS DE TRANSMISSION	9
2.4 LONGUEUR ELEMENTAIRE	10
2.5 LES BRUITS	10
3. LES SUPPORTS DE TRANSMISSION	11
3.1 TRANSMISSION SUR SUPPORTS FILAIRES EN CUIVRE	11
3.1.1 SUPPORTS BIFILAIRES (SYMÉTRIQUES)	11
3.1.2. SUPPORT COAXIAL	11
3.2 TRANSMISSION PAR FIBRE OPTIQUE	12
3.3 LES ONDES EN TRANSMISSION A VUE DIRECTE	13
3.3.1 TRANSMISSIONS PAR RAYONS LASER	13
3.3.2 TRANSMISSIONS PAR FAISCEAUX HERTZIENS	13
3.4 TRANSMISSIONS PAR SATELLITE	14
4. TYPES DE TRANSMISSION	14
4.1 BANDE DE BASE OU TRANSPPOSITION DE FREQUENCE (MODULATION)	14
4.1.1 TRANSMISSION EN BANDE DE BASE. CODAGE DU SIGNAL	15
4.1.2 TRANSMISSION PAR TRANSPPOSITION DE FREQUENCE (MODULATION)	16
4.1.3 ARCHITECTURE D'UN MODEM	18

5. LE MULTIPLEXAGE	19
5.1 MULTIPLEXAGE EN FREQUENCE OU FDM (FREQUENCE DIVISION MULTIPLEXING)	19
5.2 LE MULTIPLEXAGE TEMPOREL OU TDM (TIME DIVISION MULTIPLEXING)	20
5.3 LE MULTIPLEXAGE STATISTIQUE, D'ETIQUETTE OU DE POSITION	20

STRUCTURE DES SYSTEMES DE COMMUNICATIONS

1. CIRCUIT DE DONNEES	22
2. MODES D'EXPLOITATION	24
2.1 LIAISON SIMPLEX	24
2.2 LIAISON SEMI-DUPLEX (HALF DUPLEX)	24
2.3 LIAISON DUPLEX INTEGRAL (FULL DUPLEX)	25
2.4 TRANSMISSION SERIE ET PARALLELE	25
2.4.1 TRANSMISSION SERIE	25
2.4.2 TRANSMISSION PARALLELE	26
2.4.3 COMPARAISON ENTRE TRANSMISSION SERIE ET TRANSMISSION PARALLELE	26

NORMALISATIONS DES JONCTIONS

1. INTRODUCTION	27
2. NORME V28	28
3. NORME V11 (RS422 ET RS485)	29
4. LIAISON V24 (RS232)	30
4.1 DEFINITIONS	30
4.2 ETABLISSEMENT D'UNE LIAISON V24	31
4.3 CABLAGES V24 OU RS232	32
5. LIAISON X21	33
5.1 DEFINITIONS	33

TRANSMISSION ASYNCHRONE

1. PRINCIPE	35
2. TRAME ASYNCHRONE	36
3. CODAGE DES CARACTERES	38
4. PROTOCOLES ASYNCHRONES	38
4.1 PROTOCOLES DE CONTROLE DE FLUX	39
4.1.1 PROTOCOLE MATERIEL RTS/CTS (DTR/DSR)	39
4.1.2 PROTOCOLE LOGICIEL XON/XOFF	40
4.2 PROTOCOLES DE TRANSFERT DE FICHIERS	40

TRANSMISSION SYNCHRONE

1. PRINCIPES	42
2. MODES DE LIAISON	43
2.1 MODES DE COMMUNICATION BIPOINT	44
3. LES PROCEDURES (OU PROTOCOLES) DE LIAISON DE DONNEES	45
3.1 DETECTION ET CORRECTION DES ERREURS	46
3.1.1 CODES POLYNOMIAUX	47
3.1.2 CODES NORMALISES	49
3.2 PRINCIPES DES PROCEDURES EN LIGNE	49
3.2.1 PROCEDURE ENVOYER ATTENDRE	50
3.2.2 PROCEDURE ENVOYER ATTENDRE AVEC NUMEROTATION DES TRAMES (MODULO2)	51
3.2.3 PROCEDURE A FENETRE COULISSANTE	53
3.3 PROCEDURE HDLC	56
3.3.1 STRUCTURE DES TRAMES	56
3.3.2 MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA PROCEDURE HDLC	58
3.3.3 DESCRIPTION DES ECHANGES	59

INTRODUCTION

1. Concepts de base

Un système de communication a pour fonction d'assurer le transport de l'information entre un émetteur et un (ou plusieurs) récepteur(s) reliés par un canal de communication (figure 1). Cette information est transportée sur le canal sous forme d'un signal. Des exemples de systèmes de communication pris hors du domaine informatique sont : le téléphone, la télévision, les appareils hifi.

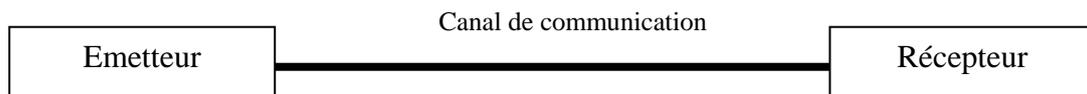


figure 1 : système de communication

On peut caractériser les systèmes de communication par le type de l'information transmise (son, image vidéo, donnée informatiques, ...) et les transformations nécessaires pour transmettre cette information (par exemple pour un son, transformation d'un signal acoustique en un signal électrique).

Tout le problème de la transmission est de trouver une "bonne" transformation de l'information en signal tel que le canal soit capable de le propager "correctement", c'est-à-dire que le récepteur puisse trouver suffisamment d'informations dans le signal reçu pour reconstituer l'information initiale.

Pour communiquer ces systèmes disposent de trois blocs fonctionnels :

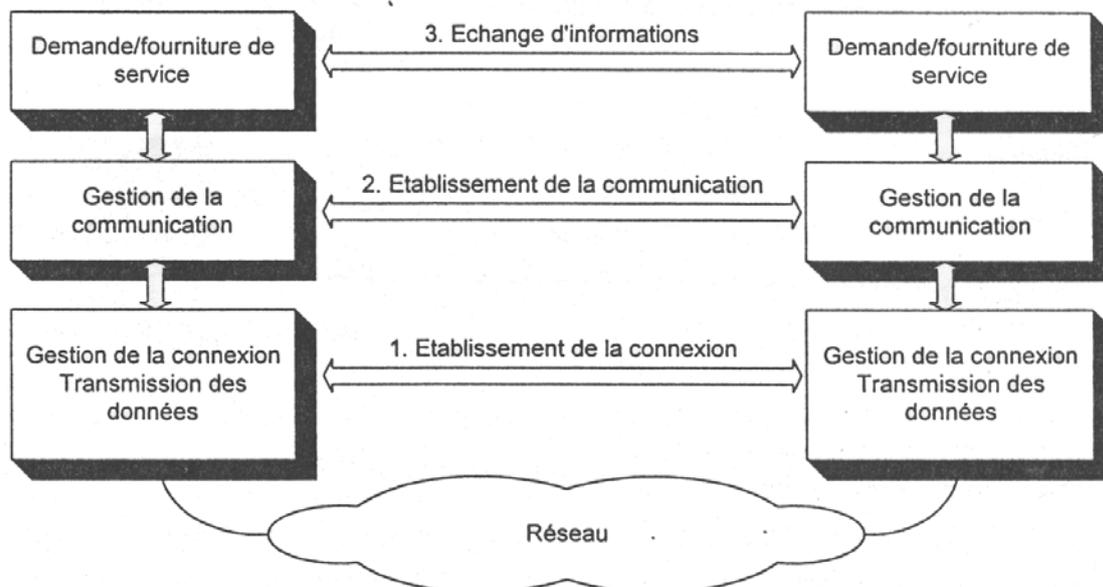


figure 2 : Architecture des systèmes de communication

2. Notion de protocole

Un protocole de communication est l'ensemble des procédures et informations échangées pour établir et gérer cette communication. Les formats des informations font partie intégrante du protocole. Pour comprendre cette notion de protocole et le rôle des 3 blocs fonctionnels montrés au paragraphe I, examinons les phases successives de l'établissement d'une communication téléphonique entre 2 directeurs.

Chaque directeur dispose d'un secrétariat comme le montre la figure 3. Cinq phases successives d'établissement de la communication peuvent être distinguées.

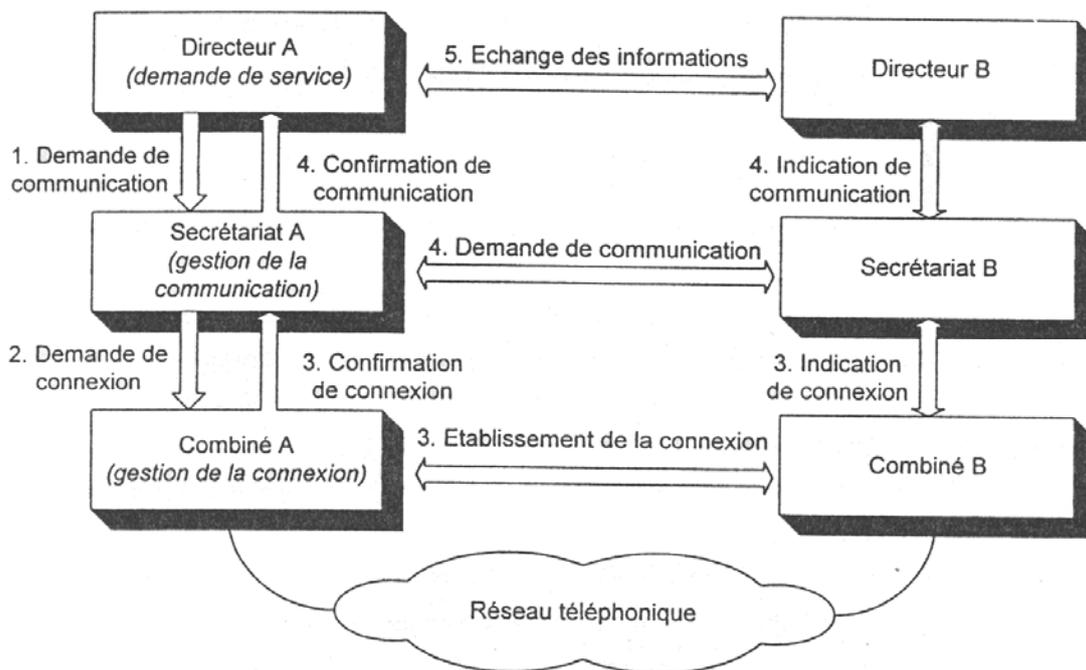


figure 3 : exemple protocole de communication

Phase 1 : le directeur A demande à sa secrétaire d'appeler le directeur B ;

Phase 2 : la secrétaire A compose le numéro de téléphone du directeur B sur son combiné téléphonique ;

Phase 3 : le réseau téléphonique établit la liaison avec le combiné téléphonique de la secrétaire B (le combiné B sonne, la secrétaire B décroche, la secrétaire A entend le déclic de confirmation de l'établissement de la connexion) ;

Phase 4 : la secrétaire A demande si elle peut parler au directeur B. La secrétaire B indique au directeur B que la secrétaire A veut lui parler. Si le directeur B accepte la communication, la secrétaire B répond à la secrétaire A qu'elle lui passe le directeur B au téléphone. La secrétaire A confirme au directeur A qu'il est en communication avec le directeur B ;

Phase 5 : les 2 directeurs peuvent échanger leurs informations.

Cette description montre qu'il existe un dialogue entre deux blocs contigus d'un système, d'une part, un dialogue entre blocs de même niveau fonctionnel de chacun des 2 systèmes distants d'autre part.

Il faut également noter qu'une **demande** par un bloc fonctionnel nécessite en retour une **confirmation** positive ou négative de cette demande. L'exemple de l'établissement d'une connexion sur le réseau téléphonique illustre ce dialogue.

3. Modèle de référence de l'ISO

Afin de résoudre les problèmes de compatibilité qui se posent pour l'interconnexion d'équipements conçus par des constructeurs différents, un effort de normalisation internationale a été entrepris par l'ISO (*International Standards Organization*) pour définir une architecture stratifiée pour systèmes ouverts, appelée *modèle de référence de base pour l'interconnexion de systèmes ouverts*, et plus connue sous le sigle *OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model)*.

Le modèle OSI est un cadre de référence couvrant l'ensemble des normes de protocoles de communication qui doivent être mis en oeuvre pour l'interconnexion de systèmes hétérogènes. Un système est dit ouvert lorsqu'il permet la communication entre logiciels et équipements différents, pourvu que ces derniers assurent leurs fonctions en conformité avec l'ensemble des normes définies dans le cadre du modèle OSI. Par opposition à un système ouvert, un *système fermé* ne permet en principe de mettre en relation que des équipements en provenance d'un même constructeur, selon des protocoles qui lui sont propres et qui peuvent évoluer dans le temps sous son seul contrôle.

L'architecture OSI est basée sur une décomposition en sept couches :

1. Application (Application)
2. Présentation (Presentation)
3. Session (Session)
4. Transport (Transport)
5. Réseau (Network)
6. Liaison de données (Data-Link)
7. Physique (Physical)

Les couches transport, réseau, liaison de données et physique sont orientées vers l'acheminement des données et fournissent les *services de transport* (*Transport Services*) qui masquent vis-à-vis des couches supérieures les caractéristiques particulières des moyens de communication et de connexion utilisés. Les couches session, présentation et application fournissent les *services d'accès* (*Access Services*).

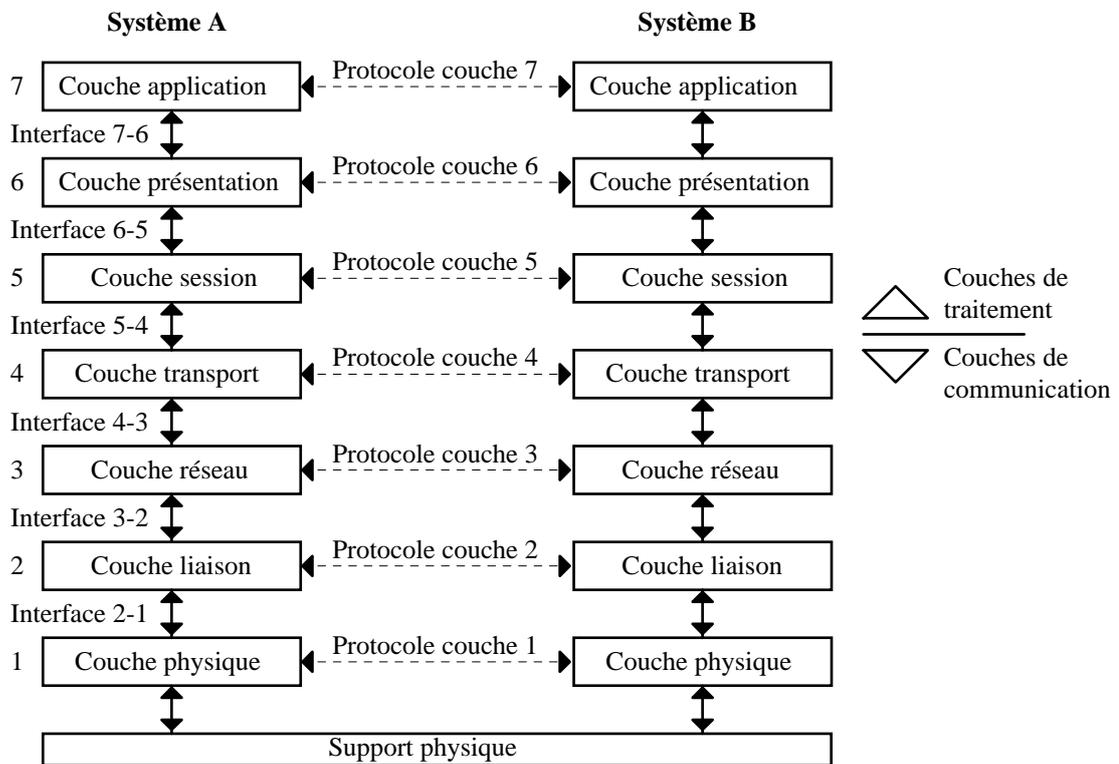


figure 4 : Architecture en couches de l'ISO

Les différentes couches du modèle OSI peuvent être caractérisées par les services et les fonctions qu'elles fournissent. Nous ne décrivons dans ce cours que les deux couches basses de ce modèle.

La *couche physique* assure la transmission transparente des bits des messages. Ce niveau rassemble les protocoles qui spécifient les caractéristiques mécaniques, électriques et fonctionnelles des circuits de données, ainsi que les protocoles d'établissement, de maintien et de libération du circuit. La couche physique ne concerne que la transmission des bits sur les voies physiques, et correspond par exemple à un circuit constitué par une ligne et ses deux modems. L'architecture définit dans ce cas les caractéristiques électriques des circuits d'interface modem-terminal, les caractéristiques des connecteurs de cette interface, ainsi que le protocole d'établissement, de maintien et de libération du circuit.

Les circuits de données disponibles au niveau physique présentent généralement des caractéristiques de fiabilité et de taux d'erreurs qui sont inacceptables pour les équipements qui les exploitent. Afin de pallier ces défauts, la ***couche de liaison de données*** utilise les services de la couche physique pour établir entre les entités communicantes une connexion logique pratiquement exempte d'erreurs. Les données sont organisées sous forme de *trames*, et les erreurs de transmission sont détectées grâce à un code, ce qui permet au destinataire d'acquiescer les trames reçues correctement et de demander la retransmission de celles qui sont entachées d'erreurs. La liaison de données peut être point à point ou multipoint, et le protocole assure une régulation de flux.

LIGNES DE TRANSMISSION

1. Introduction

Les liaisons de données utilisées en téléinformatique fonctionnent avec des débits pouvant aller de quelques dizaines de bits par seconde à quelques dizaines de mégabits par seconde. A l'exception de circuits locaux d'une portée limitée à, quelques kilomètres au maximum, la plupart des liaisons de données empruntent des lignes aux réseaux publics de télécommunications. Ces lignes ont des caractéristiques relativement bien définies, dont il importe de connaître les caractéristiques pour concevoir et exploiter un réseau de téléinformatique.

2. Caractéristiques des supports de transmission

2.1 Bande passante

Une voie peut être caractérisée par sa largeur de bande ou bande passante, sa courbe d'affaiblissement et sa capacité à transporter de l'information.

La bande passante B d'une voie est la plage de fréquences sur laquelle la voie est capable de transmettre des signaux sans que leur affaiblissement soit trop important. Elle s'exprime en Hertz. La courbe d'affaiblissement donne la valeur du rapport d'affaiblissement des signaux en fonction de la fréquence (figure 5). Le rapport d'affaiblissement est le rapport entre l'amplitude du signal reçu et la puissance du signal émis. Il est considéré comme nul pour les fréquences hors de la bande passante, et constant pour les fréquences dans la bande passante (d'où le nom de filtre passe-bande linéaire donné aux voies).

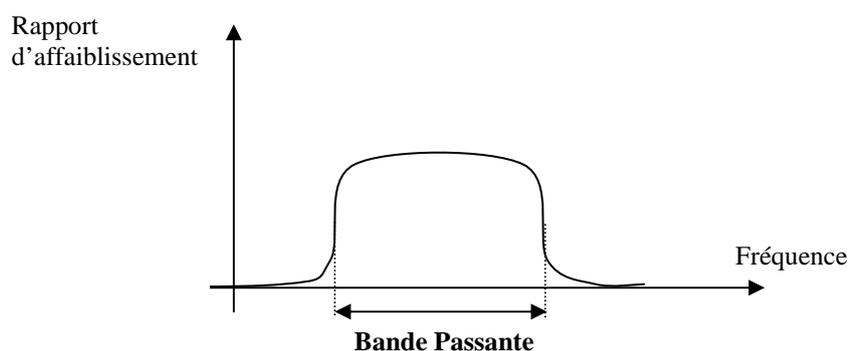


figure 5 : Bande passante d'une voie

2.2 Capacité

La capacité (ou débit maximal) d'une voie est la quantité maximale d'information qu'elle peut transporter par seconde. L'unité d'information étant le bit, la capacité s'exprime en bit/s. Une voie de transmission ayant une largeur de bande B Hz, ne peut transmettre des signaux dont la vitesse de modulation est supérieure à 2B bauds.

Ainsi, le réseau téléphonique dont la largeur de bande est de 3 100 Hz (300 à 3400 Hz) permet théoriquement des vitesses de modulation maximales de 6 200 bauds.

Le débit binaire maximum ou capacité C d'une ligne de transmission peut être défini suivant les caractéristiques de la ligne par la relation :

$$C = B \log_2 (1 + S/N)$$

S/N étant le rapport signal/bruit en puissance du signal, généralement exprimé sous la forme :

$$10 \log_{10} S/N \text{ en décibel (dB).}$$

En reprenant l'exemple du réseau téléphonique et pour un rapport signal/bruit typique de 1000 (30 dB), on obtient une capacité maximale de l'ordre de 31 000 bit/s. Cette valeur théorique est rarement atteinte à cause des diverses imperfections de la voie (le débit moyen sur un modem V34 est souvent inférieur à 28800 bit/s).

2.3 Temps de propagation et temps de transmission

Le temps de propagation T_p est le temps nécessaire à un signal pour parcourir un support d'un point à un autre, ce temps dépend donc de la nature du support, de la distance et également de la fréquence du signal.

Pour une transmission radioélectrique par satellite, ce temps est calculé à partir de la vitesse de propagation qui est égale à celle de la lumière, soit 300_000 km/s. Sur le réseau téléphonique utilisant des paires métalliques, ce temps de propagation peut être compris entre 10 et 40 μ s par kilomètre. Pour des liaisons locales à grand débit sur câble coaxial, telles que celles mises en oeuvre sur le réseau Ethernet, le temps de propagation est estimé à environ 4 μ s/km.

Le temps de transmission T_t est le délai qui s'écoule entre le début et la fin de la transmission d'un message sur une ligne, ce temps est donc égal au rapport entre la longueur du message et le débit de la ligne.

Le temps de traversée ou délai d'acheminement sur une voie est égal au temps total mis par un message pour parvenir d'un point à un autre, c'est donc la somme des temps T_p et T_t .

Pour évaluer l'importance relative du temps de propagation T_p , il est nécessaire de comparer celui-ci au temps de transmission T_t du message sur la ligne.

Ainsi pour un message de 100 bits transmis à 2 400 bit/s sur une paire torsadée d'une longueur de 100 km avec un temps de propagation de 10 μ s/km on obtient :

$$T_t = 100 / 2400 = 42\text{ms} ;$$

$$T_p = 10 \times 100 = 1000 \mu\text{s} = 1 \text{ ms.}$$

Pour un message de 10_000 bits sur un réseau Ethernet à 10 Mbit/s et sur une distance de 100m, on obtient :

$$T_t = 10_000 / 10_000_000 = 1 \text{ ms} ;$$

$$T_p = 4 \times 0,1 = 0,4 \mu\text{s} = 0,0004 \text{ ms.}$$

Dans la plupart des cas, le temps de propagation pourra donc être négligé devant le temps de transmission.

2.4 Longueur élémentaire

La longueur élémentaire d'une voie est la longueur maximale de support au delà de laquelle le signal doit être amplifié ou répété pour être correctement reçu. En effet, le signal s'affaiblit au fur et à mesure de sa propagation dans le support. C'est pour cela qu'il est en général amplifié avant d'être émis. L'importance de l'affaiblissement dépend des caractéristiques physiques du support : il est moins important dans les fibres optiques que dans les câbles électriques, dans les câbles coaxiaux que dans les paires torsadées.

2.5 Les bruits

La communication peut être perturbée par des signaux parasites d'origines très différents : bruit blanc dû à l'agitation thermique dans les composants du système, bruit impulsif dû principalement aux organes électromécaniques de commutation, bruit diaphonique engendré par d'autres voies, ou échos. Le **bruit blanc** (*White Noise*) a en général une puissance assez faible, et il est relativement facile d'obtenir des lignes téléphoniques sur lesquelles le rapport signal/bruit peut atteindre 25 dB à 30 dB, ce qui est suffisant pour assurer une transmission dans de bonnes conditions avec la plupart des modems. Le **bruit impulsif** (*Impulse Noise*) est beaucoup plus gênant car il peut atteindre une amplitude égale ou supérieure à celle du signal pendant une durée de l'ordre de 1 ms à 10 ms, ce qui provoque des **rafales d'erreurs** (*Error Burst*) sur les données transmises. Le bruit impulsif est la principale cause d'erreurs sur les lignes téléphoniques classiques, particulièrement lorsque celles-ci

empruntent le réseau commuté. Le **bruit diaphonique** (*Cross Talk*) introduit par les lignes voisines est en général négligeable pour les transmissions de données.

Le **bruit d'écho** est provoqué par une réflexion du signal due à des désadaptations d'impédance et à un équilibrage imparfait des terminaisons de lignes. l'écho se traduit par le retour à l'émetteur d'une réplique affaiblie et retardée du signal qu'il a envoyé.

3. Les supports de transmission

3.1 Transmission sur supports filaires en cuivre

Les supports en cuivre employés sont la paire torsadée et le câble coaxial.

3.1.1 Supports bifilaires (symétriques)

La **paire torsadée** est le support de transmission le plus ancien et encore le plus largement utilisé, principalement pour les services téléphoniques. La paire torsadée est composée de deux conducteurs en cuivre, isolés l'un de l'autre, et enroulés de façon hélicoïdale autour de l'axe longitudinal. L'affaiblissement croît rapidement avec la longueur du support.

Le débit binaire accessible dépend de la qualité du câble et de sa longueur ; il peut varier entre quelques dizaines de Kbit/s sur quelques dizaines de km, quelques Mbit/s sur quelques km et plusieurs centaines de Mbit/s pour quelques centaines de mètres. La sensibilité aux parasites d'origine électromagnétique est relativement importante mais peut être réduite si le câble est blindé. Enfin, le taux d'erreur est de l'ordre de 10^{-3} . Le rayonnement électromagnétique d'un câble non blindé permet l'écoute de la communication.

L'importance de l'infrastructure en paire torsadée au niveau des réseaux de télécommunication et du câblage des immeubles, ainsi que l'évolution des techniques de transmission sur des paires torsadées (ADSL, Gigabit Ethernet), font que son remplacement généralisé, par d'autres supports, ne soit pas envisagé à court terme.

3.1.2. Support coaxial

Plus cher que la paire torsadée, le câble coaxial est encore largement utilisé pour des artères à moyen débit des réseaux de transport, ainsi que pour les réseaux de télédiffusion. Deux types de câbles sont les plus utilisés, le câble à impédance caractéristique de 50 ohms (notamment pour les réseaux locaux) et le câble à impédance de 75 ohms (télédiffusion, artères internes aux réseaux téléphoniques interurbains et internationaux).

La bande passante peut atteindre 400 MHz sur plusieurs dizaines de km. Le débit binaire typiquement employé est de 10 Mbit/s (réseaux Ethernet) sur des distances inférieures à 1km et peut monter jusqu'à plusieurs centaines de Mbit/s sur des distances très courtes.

La sensibilité aux parasites ainsi que l'affaiblissement sont réduits par rapport à la paire torsadée (mais le prix est significativement plus élevé). Le taux d'erreur est de l'ordre de 10^{-7} . Le câble coaxial est progressivement remplacé par la fibre optique.

3.2 Transmission par fibre optique

Les signaux binaires sont transmis sous la forme d'impulsions lumineuses, à travers un guide d'onde en fibre de verre. Afin de maintenir les rayons lumineux à l'intérieur de la fibre optique, le phénomène de réflexion totale est employé :

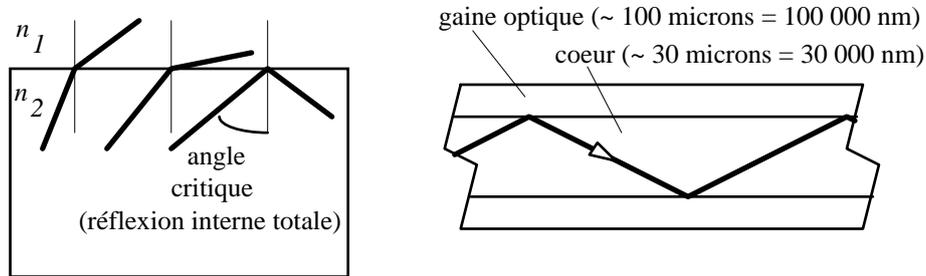


figure 6 : Transmission dans une fibre optique

L'indice de réfraction de la gaine (n_1) doit être inférieur à celui du cœur (n_2). L'angle critique est donné par la formule :

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{dans l'équation de la réfraction } n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \theta_2 = \theta_c \text{ quand } \theta_1 = 90^\circ).$$

Afin de subir uniquement des réflexions totales dans la fibre, un rayon lumineux en provenance d'une source (diode électroluminescente pour des longueurs d'onde 800-900 nm, diode laser pour 800-1300 nm) doit atteindre le bout de la fibre sous un angle d'incidence inférieur à :

$$\theta_A = \arcsin \frac{\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}{n_0}, \quad n_0 \text{ étant l'indice de réfraction de l'air.}$$

Tous les rayons qui dépassent l'angle critique subissent une réflexion totale ; ce sont donc en général plusieurs rayons, correspondant au même signal, qui se propagent à l'intérieur de la fibre optique fibre *multimode* à saut d'indice (dessins précédents) ou à gradient d'indice. Quand le diamètre du cœur de la fibre est tellement réduit (comparable à la longueur d'onde de la lumière utilisée) qu'un seul rayon peut se propager, la fibre est appelée *monomode*.

Les débits binaires varient entre plusieurs centaines de Mbit/s (fibre multimode, plusieurs km) et environ 10 Gbit/s (fibre monomode, jusqu'à 100 km). L'affaiblissement est très réduit, 0,2-0,8 dB/km, donc les transmissions sans répéteurs sur des distances de 100 à 200 km sont courantes. L'étude de l'affaiblissement dans une fibre de silice fait apparaître 3 minima : 1dB/km pour une longueur d'onde de 850 nm, 0,35 dB/km pour 1300 nm et 0,2 dB/km pour 1550 nm.

La fibre optique est insensible aux parasites d'origine électromagnétique et assure un taux d'erreur très bas, de l'ordre de 10^{-12} . Aussi, la fibre optique ne produit pas de rayonnement électromagnétique, ce qui contribue à la confidentialité des transmissions.

Grâce à ses avantages, la fibre optique non seulement remplace le câble coaxial sur les artères (*backbones*) des réseaux de télécommunication, mais s'impose aussi pour l'infrastructure des réseaux locaux à haut débit (Gigabit Ethernet) et est parfois employée pour la boucle locale (FTTO, *Fiber To The Office*). Le câble en fibre optique reste en revanche plus cher que le câble coaxial et son installation pose des difficultés supplémentaires. Après avoir été largement employées il y a quelques années, les fibres multimode sont en cours de remplacement aujourd'hui par des fibres monomode.

3.3 Les ondes en transmission à vue directe

3.3.1 Transmissions par rayons laser

Des faisceaux laser très directifs peuvent être employés comme support pour des transmissions de données entre immeubles proches. Les débits peuvent être très importants (comme pour la fibre optique) et l'absence de support à installer présente l'avantage d'un coût nettement moins élevé. En revanche, les conditions météorologiques peuvent affecter dans des cas extrêmes la qualité des communications.

3.3.2 Transmissions par faisceaux hertziens

Pour des distances plus importantes, mais toujours à vue directe (dizaines de km, en fonction de la hauteur des antennes), des faisceaux dirigés d'ondes radio peuvent être employés et présentent le même avantage de coût d'installation réduit. Les transmissions sont à transposition de fréquence, la plage de fréquences employé pour la porteuse étant de 2 à 40GHz. Il faut noter que l'atténuation du signal émis augmente fortement avec la fréquence de la porteuse. Les émetteurs utilisés pour les télécommunications sont de faible puissance (1W).

La dispersion des faisceaux étant relativement importante, des techniques de cryptage doivent être employées afin de maintenir la confidentialité des communications.

3.4 Transmissions par satellite

Les transmissions par satellite emploient les satellites *géostationnaires*, qui se trouvent sur une orbite à 36000 km d'altitude au dessus de l'équateur. Les bandes de fréquences attribuées aux réseaux de communications par satellite sont 3,7-4,2 GHz, 5,925-6,425 GHz, 12-14 GHz et 20-30GHz. Dans les deux premières bandes, l'écart de position entre deux satellites doit être supérieur à 4° (ou 8° pour les satellites de télédiffusion, de puissance plus élevée) afin d'assurer une bonne sélectivité (éviter les interférences). Les satellites de télécommunication possèdent des émetteurs de faible puissance (< 10 W) par rapport aux satellites de télédiffusion (> 500 W). Dans la troisième bande, les écarts angulaires peuvent être de seulement 1° mais l'atténuation dans l'atmosphère des signaux est beaucoup plus forte (surtout dans les particules d'eau). De façon générale, les conditions atmosphériques au sol ou en altitude peuvent affecter temporairement la qualité des communications. La quatrième bande commence seulement à être utilisée.

Les débits accessibles aux utilisateurs peuvent aller jusqu'à plusieurs Mbit/s.

Les délais de transmission sont relativement importants (250-300 millisecondes) et doivent être pris en compte dans la conception des protocoles de communication (notamment pour la correction des erreurs par retransmission).

La dispersion des faisceaux au sol étant importante, des techniques de cryptage sont indispensables pour maintenir la confidentialité des communications.

4. Types de transmission

4.1 Bande de base ou transposition de fréquence (modulation)

Dans ce qui suit nous appellerons *fréquence de bit* la fréquence à laquelle les bits successifs sont transmis.

Les informations à transmettre sont représentées par une suite de symboles binaires. Un codeur transforme cette suite en une autre, binaire ou non, en employant un codage spécifique au canal. La suite codée à nouveau peut soit correspondre directement au signal qui circule sur le canal de communication, transmission en *bande de base*, soit être employée pour modifier (moduler) un signal (*porteuse*) de fréquence supérieure à la fréquence de bit, transmission par *transposition de fréquence* ou *modulation*.

4.1.1 Transmission en bande de base. Codage du signal

Considérons d'abord un exemple où les informations sont transmises par un signal binaire correspondant au codage source (sans codage canal) :

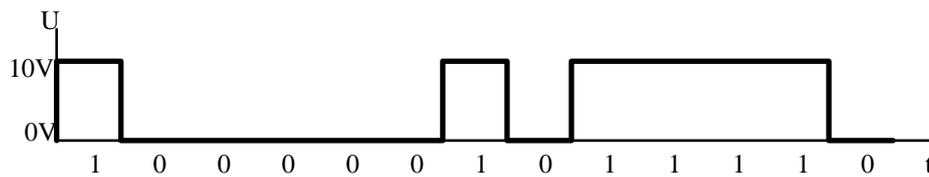


figure 7 : Bande de base

Les problèmes qui se posent :

1. Une composante continue de 5 Volts est présente dans le signal, donc la moitié de l'énergie transmise est inutile.
2. La présence d'un nombre important de 0 successifs (ou de 1 successifs) dans le signal peut nuire à la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.
3. La présence possible à la fois de séquences de type 10101010... (alternantes) et de séquences de type 100000..001.. (constantes) fait que le spectre du signal et donc la bande passante exigée au canal soit très large.

Le codage canal essaye de résoudre ou d'atténuer ces problèmes par :

1. une meilleure adaptation aux caractéristiques physiques du canal de transmission.
2. une meilleure synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.
3. la réduction de la bande passante exigée.

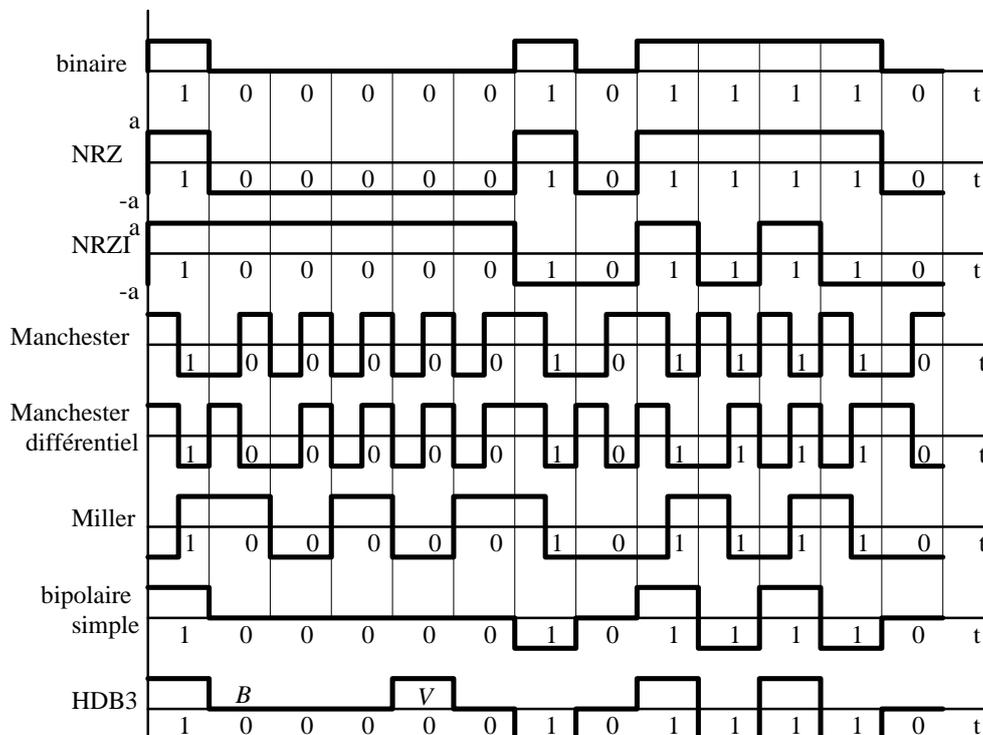


figure 8 : Codages canal

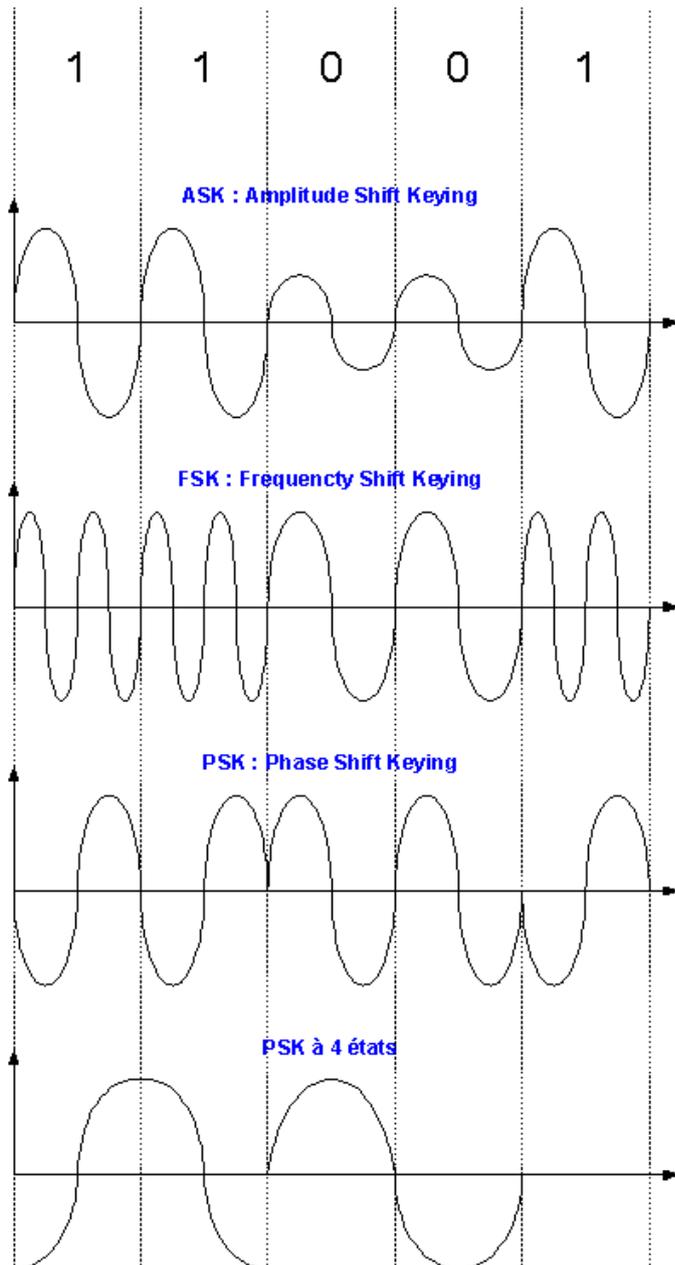
Le choix entre les différents codages est effectué en fonction des caractéristiques du canal, du type de transmission et du débit binaire exigé. Le seul codage non redondant est NRZ/NRZI, mais il pose d'importants problèmes de synchronisation. Le codage Manchester, le codage de Miller et le codage bipolaire sont plus sensibles au bruit (pour Manchester, le spectre est deux fois plus large ; pour Miller, l'annulation de la composante continue n'est pas totale ; pour les codes bipolaires trois niveaux de tension sont employés). Les plus utilisés pour des transmissions synchrones sont les codages Manchester différentiel, Miller et HDB n .

La transmission en bande de base présente l'avantage de la simplicité et donc du coût réduit des équipements. Elle exige en revanche des supports n'introduisant pas de décalage en fréquence (transmission sur câble).

4.1.2 Transmission par transposition de fréquence (modulation)

La transposition de fréquence est un ensemble de procédés par lesquels la bande de fréquence d'un signal est décalée dans le domaine fréquence. La transmission par transposition de fréquence assure en général une meilleure protection contre le bruit et permet le multiplexage en fréquence (voir plus loin). La transposition de fréquence devient indispensable quand le signal à transmettre n'est pas dans un domaine de fréquence correspondant au support.

Plusieurs types de modulations sont utilisées :



Dans chacun des exemples, la suite de bits à émettre est la suite ci-contre. Les modulations les plus simples sont l'ASK (Amplitude Shift Keying), la FSK (Frequency Shift Keying) et la PSK (Phase Shift Keying).

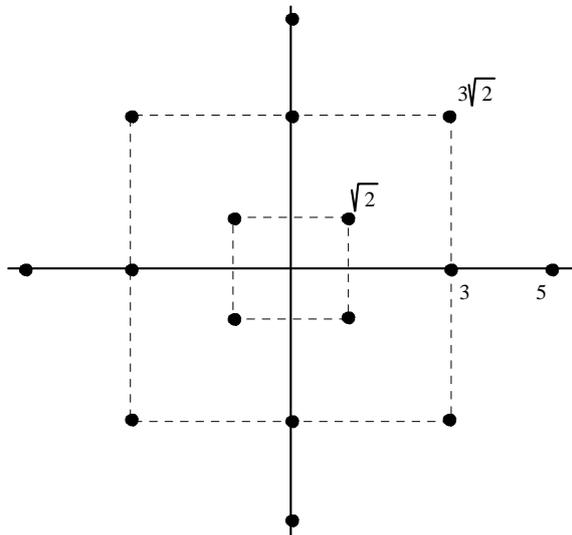
La modulation d'amplitude ou ASK :
L'amplitude du signal varie du simple au double suivant que l'on veut transmettre un 0 ou un 1.

La modulation de fréquence ou FSK :
La fréquence du signal varie du simple au double suivant que l'on transmette un 0 ou un 1.

La modulation de phase ou PSK :
La phase du signal varie en fonction du bit à envoyer.

Chacune de ces modulations peut avoir 2 états (0 ou 1), comme sur les exemples précédents, mais également 4, 8, 16 ou plus états. L'exemple ci-contre illustre une modulation PSK à 4 états.

D'autres modulations plus élaborées sont possibles. D'ailleurs, la plupart des modems les utilisent actuellement. Nous allons voir maintenant l'exemple de la modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) à 4 états.



La modulation QAM à 16 états

Pour l'avis V29 du CCITT qu'utilisent certains modems sur le réseau téléphonique commuté, la rapidité de modulation est de 2400 bauds et le débit binaire de 9600 bits/s ; ce qui signifie que chaque intervalle de modulation code 4 bits consécutifs (16 combinaisons possibles). Ceci est possible grâce à l'emploi d'une modulation combinée d'amplitude et de phase, pour laquelle le diagramme suivant a été retenu :

4.1.3 Architecture d'un modem

L'architecture d'un modem est donc la suivante :

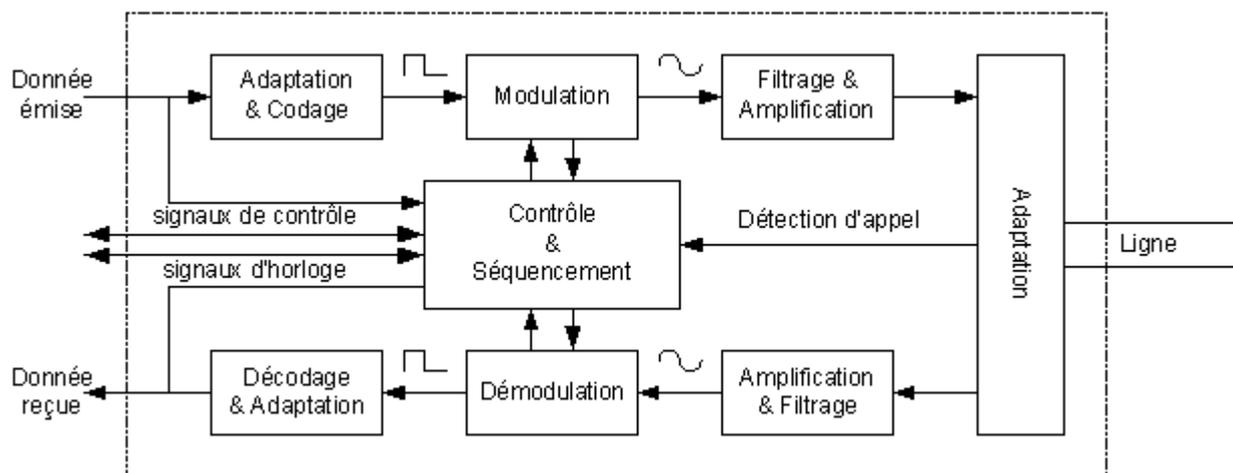


figure 9: Architecture d'un modem

Du côté du PC, on retrouve des fils contenant les signaux d'horloge, les signaux de contrôle, ainsi que ceux contenant les données émises et reçues. Ces données reçues en numérique seront adaptées puis modulées pour être ensuite envoyées sur la ligne de transmission. A la réception, les signaux sont démodulés pour être retransmis vers le PC en numérique. Un module particulier s'occupe de la détection des appels, ainsi que du contrôle et du séquencement des opérations.

5. Le multiplexage

Le multiplexage permet de transmettre n canaux de communication (voies incidentes) de débit d sur un support (voie composite) qui accepte le débit $D = n \times d$.

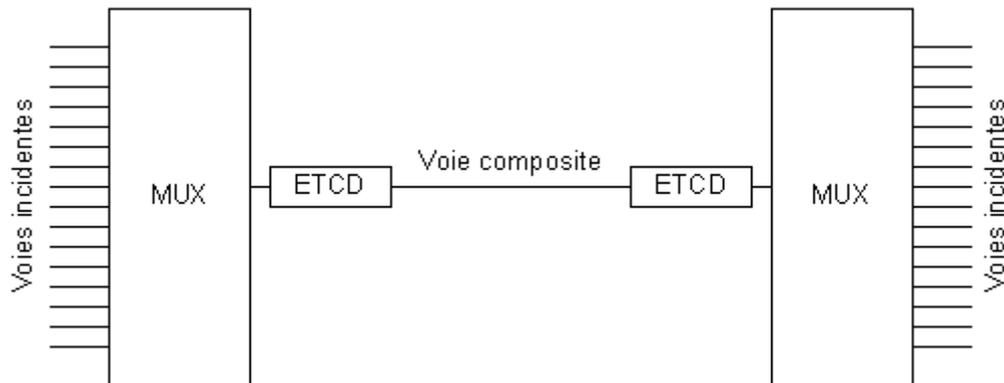


figure 10 : Multiplexage sur voie composite

Pour parvenir à mélanger ces différents signaux sur une même ligne pour pouvoir les retrouver ensuite, il existe trois méthodes.

5.1 Multiplexage en fréquence ou FDM (Frequency Division Multiplexing)

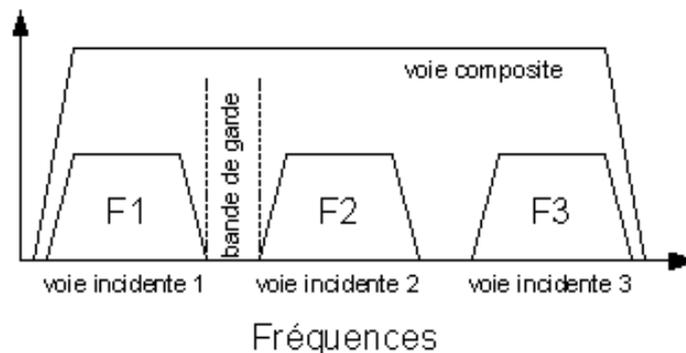


figure 11 : Multiplexage fréquentiel

Le multiplexage en fréquence consiste à appliquer une transposition de fréquence différente au signal sur chaque canal, afin d'occuper uniformément la bande disponible sur le support à large bande (voir la figure suivante); les signaux modulés sont alors émis simultanément. Des filtres passe-bande sont employés à l'arrivée afin de choisir un canal.

5.2 Le multiplexage temporel ou TDM (Time Division Multiplexing)

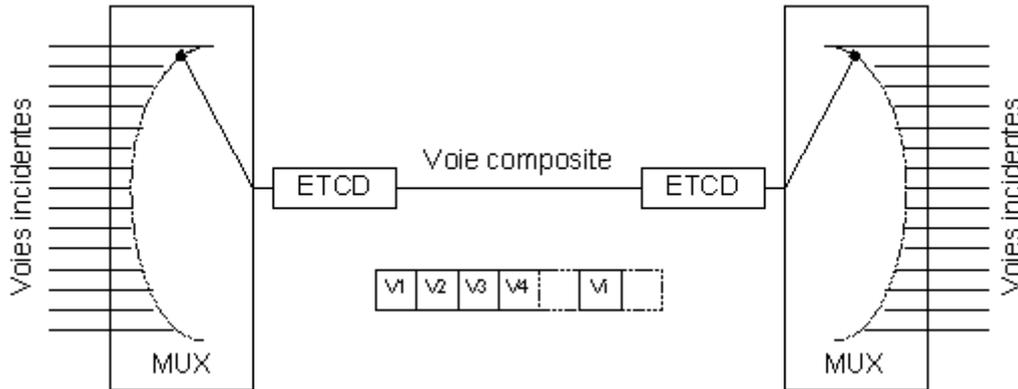
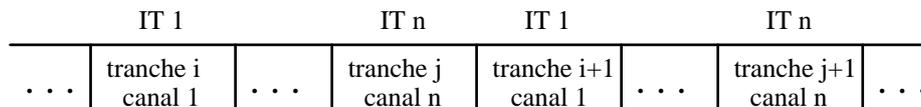


figure 12 : Multiplexage temporel

La voie composite est plus rapide que les N voies incidentes. Ainsi, quand chaque voie incidente fait passer i octets de données, la voie composite peut elle faire passer $N \times i$ octets de données. Ce principe est assez simple. Imaginez simplement que vous souhaitez faire passer 2 fois 56 kbps sur une ligne. Il vous suffit simplement d'une ligne à 128 kbps. Pendant une demi-seconde, vous faites passer les 56 kilobits de la première ligne, et dans la deuxième demi-seconde, vous faites passer les 56 kilobits de la deuxième ligne.



Les IT (intervalle de temps) alloués à chaque canal sont bien définis. Cela permet de réduire la quantité d'informations de signalisation à faire circuler, mais réduit l'efficacité du multiplexage : quand plusieurs canaux sont inactifs, leurs IT restent inutilisés.

5.3 Le multiplexage statistique, d'étiquette ou de position

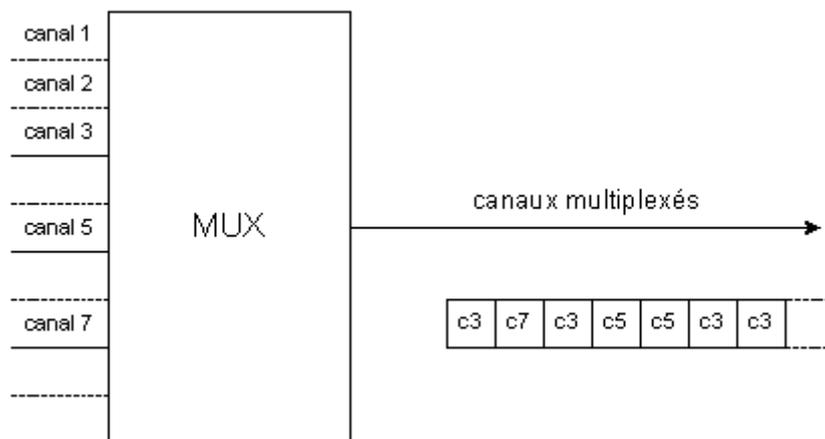


figure 13 : Multiplexage statistique

Il s'agit de regarder quelles sont les lignes qui émettent réellement des signaux. Dans notre exemple, on peut voir que les canaux 1, 2, 3, 5 et 7 émettent alors que les autres liaisons sont inutilisées. Dans ce cas, on fait passer les informations les unes derrière les autres, comme pour le multiplexage temporel, mais uniquement les informations réelles et l'identification du canal est ajoutée à chaque tranche d'informations. Statistiquement, les canaux ne seront jamais tous utilisés, ce qui permet d'avoir un débit moins important que le nombre de canaux fois le débit de chaque canal ($D < n \times d$).

STRUCTURE DES SYSTEMES DE COMMUNICATION

1. Circuit de données

Dans le cas de la transmission de données informatiques, l'information à transmettre est une séquence binaire (ou message binaire) et les éléments constituant un système bipoint sont :

1. L'émetteur ou le récepteur : Situé à l'extrémité de la liaison, il peut être un ordinateur, une console de programmation, une imprimante, ou plus généralement tout équipement qui ne se connecte pas directement à la ligne de transmission. On les appelle **Equipements Terminaux de Traitement** (émission et réception) de **Données**, dits **ETTD** ou **DTE** : *Data Terminal Equipment*.
2. Le canal de communication, (ou voie ou ligne de transmission) : support physique qui peut être un câble électrique, une fibre optique ou une onde hertzienne.

L'information est transportée sur la voie sous forme d'un **signal** résultant de la transformation de l'information binaire pour l'adapter au support. Cette transformation est réalisée par des appareils situés à chaque extrémité de la voie et appelés **ETCD** : **Equipements Terminaux de Circuit de Données**, ou **DCE** : *Data Communication Equipment*. Ils peuvent être un **modem**, un multiplexeur, un concentrateur ou simplement un adaptateur (pseudo-modem).

L'ensemble "ligne plus modems" s'appelle un **circuit de données**. On appelle **liaison de données** (bipoint) l'ensemble formé des ETTD, des ETCD et de la ligne (figure 4).

La communication entre systèmes informatiques s'effectue via des liaisons dont les principaux éléments sont définis par les recommandations de l'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications - secteur des Télécommunications). La figure 14 met en évidence ces différents éléments.

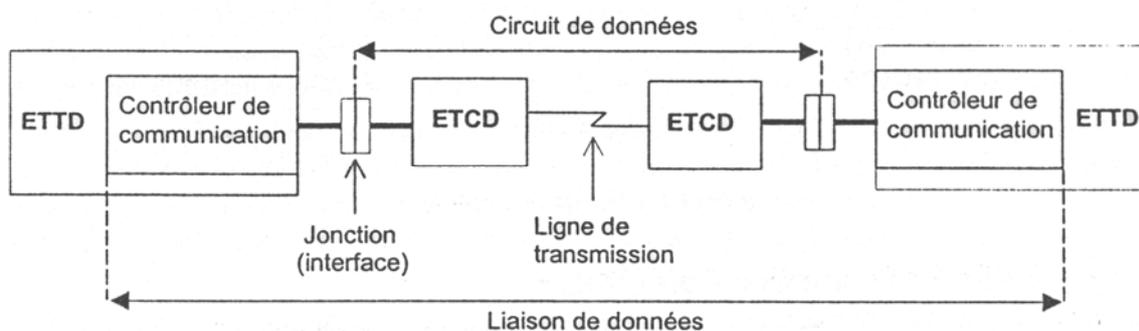


figure 14 : éléments d'une liaison

L'ETCD, la plupart du temps un modem, a deux fonctions essentielles :

- l'adaptation du signal binaire entre l'ETTD et la ligne de transmission, ce qui correspond généralement à un codage et une modulation (ou une démodulation et un décodage suivant qu'il émet ou reçoit) ;
- la gestion de la liaison comprenant l'établissement, le maintien et la libération de la ligne à chaque extrémité.

La **jonction** constitue l'interface entre ETCD et ETTD et permet à ce dernier de contrôler le circuit de données (établissement et libération, initialisation de la transmission...).

2. Modes d'exploitation

Le transfert d'informations entre deux systèmes informatiques peut s'effectuer, en fonction des besoins et des caractéristiques des éléments, suivant trois modes d'exploitation de la liaison.

2.1 Liaison simplex

Le système A est un émetteur, le système B est un récepteur, les données sont transmises dans un seul sens (figure 15). L'exploitation en mode unidirectionnel est justifiée pour les systèmes dont le récepteur n'a jamais besoin d'émettre (liaisons radio ou télévision).

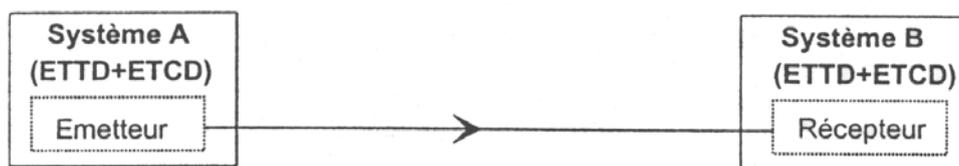


figure 15 : Liaison simplex

2.2 Liaison semi-duplex (half duplex)

La transmission est possible dans les deux sens mais non simultanément, l'exploitation est en mode bidirectionnel à l'alternat (figure 16). Ce type de liaison est utilisé lorsque le support physique est commun aux deux sens de transmission (cas des lignes téléphoniques) et ne possède pas une largeur de bande suffisante pour permettre des liaisons bidirectionnelles simultanées par modulation de deux fréquences porteuses différentes; des procédures particulières permettent alors d'inverser le sens de transmission (liaison CB par exemple).

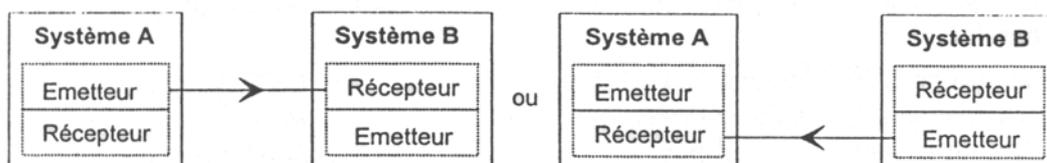


figure 16 : Liaison half duplex

2.3 Liaison duplex intégral (full duplex)

Les données peuvent être émises ou reçues simultanément dans les deux sens, l'exploitation est en mode bidirectionnel simultané (figure 17). A chaque sens de transmission correspond un canal de communication propre ; lorsque le support physique est commun aux deux sens de transmission, chaque canal est défini dans une bande de fréquence spécifique.

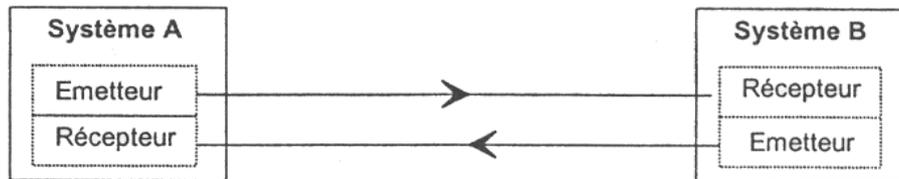


figure 17 : Liaison full duplex

2.4 Transmission série et parallèle

Les données informatiques se présentent sous forme de bits groupés en mots généralement de 8 bits (un octet). Pour transmettre un mot entre deux ETTD ou un ETTD et un ETCD, on peut procéder :

- bit par bit et reconstituer les mots du côté réception ;
- mot par mot.

Le premier type est dit, transmission série, le second transmission parallèle.

2.4.1 Transmission série

Les bits d'un mot sont transmis un à un sur une ligne unique, les 0 et les 1 sont représentés par des signaux électriques d'amplitude et d'intervalle de temps connus. Pour émettre un caractère de n bits il faut $n \times Dt$ (Dt étant le temps de transmission d'un bit).

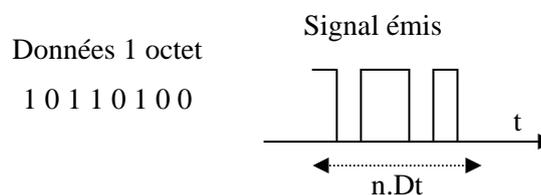


figure 18 : Exemple de transmission série

2.4.2 Transmission parallèle

La transmission se fait sous forme de lot de bits émis simultanément sur le canal. Pour émettre un caractère de n bits il faut un Dt .

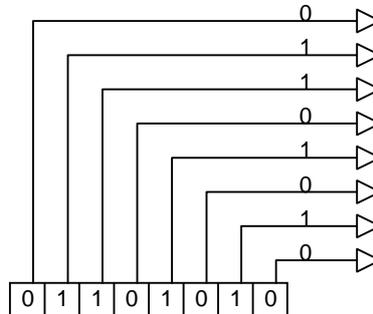


figure 19 : Exemple d'un transmission parallèle

2.4.3 Comparaison entre Transmission série et Transmission parallèle

La transmission parallèle est de loin la plus rapide, il suffit d'un seul intervalle de temps Dt pour transmettre un mot de 8 bits, alors que pour une transmission série 8 Dt sont nécessaires. A part cet avantage, elle ne peut se réaliser que sur de faibles distances pour éviter les problèmes de déphasage qui peuvent survenir sur les signaux du lot d'information envoyé en parallèle. La transmission série est utilisée surtout pour la communication entre des équipements distants, alors que la transmission parallèle est utilisée typiquement pour la communication entre un ordinateur et ces périphériques (comme pour le cas des imprimantes).

NORMALISATION DES JONCTIONS

1. Introduction

Les différents équipements doivent être compatibles entre eux afin d'en faciliter l'interconnexion ; cette compatibilité est assurée au niveau de jonctions modem-ligne et modem-ETTD. Leur normalisation a pour objectif de classer les modes de transmission de façon à ce que la transmission soit possible entre tout couple de modems respectant la même norme.

Les principales normes électriques, mécaniques et fonctionnelles rencontrées dans les liaisons séries entre ETTD et ETCD, et par extension entre deux ETTD, sont définies par les avis et recommandations de l'UIT-T, par l'ISO (*International Standardisation Organization*), ainsi que par l'association américaine EIA (*Electrical Industry Association*).

Certaines de ces normes sont équivalentes mais font l'objet de différentes appellations. Ainsi, la norme RS232C définie par l'EIA correspond aux avis V24 et V28 de l'UIT-T et à la norme ISO2110 qui fixent respectivement les caractéristiques fonctionnelles, électriques et mécaniques (définition des connecteurs) des liaisons. Les normes RS449 (V36) et RS530 conçues à l'origine pour remplacer RS232C restent incompatibles mécaniquement et électriquement avec cette dernière. La recommandation V35 a été définie à l'origine comme standard de communication à 48 kbit/s sur circuits 60-108 kHz.

Le classement est défini par les critères suivants :

- Technique de transmission : bande de base ou modulation.
- Débit : 300, 600, 1200, 2400, 9600, 12 900...bit/s.
- Support de transmission : réseau commuté, lignes spécialisées semi-duplex (avec ou sans voie de retour) ou duplex.
- Méthode de synchronisation : synchrone ou asynchrone.

2. Norme V28

La norme V28 détermine les caractéristiques électriques des signaux pour des liaisons telles que celle d'un port série de PC avec un modem en boîtier externe. Le support de transmission pour chaque signal est réalisé sur un fil référencé par rapport à une masse commune, ce qui réduit le nombre de fils mais limite les débits et les distances entre systèmes. Les valeurs de tension correspondant aux circuits logiques en entrée ou sortie des équipements (circuits en technologie TTL ou CMOS) sont adaptées pour la liaison conformément à l'avis V28 (figure 20). Ainsi, à un niveau logique 1, correspond une tension de l'ordre de + 5 V avant adaptation et une tension comprise entre -3 V et -25 V sur le câble ;

de même à un niveau logique 0, correspond une tension de l'ordre de 0 V avant adaptation et une tension comprise entre + 3 V et + 25 V sur le câble.

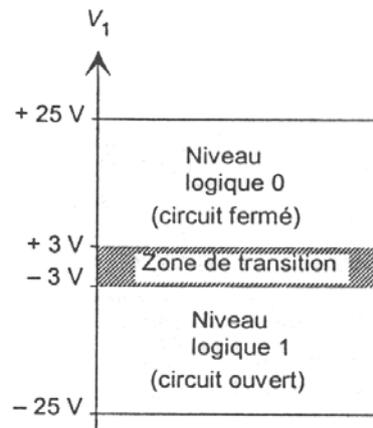


figure 20 : niveaux significatifs

3. Norme V11 (RS422 et RS485)

La norme V11 définit les caractéristiques électriques des signaux sur un support de transmission différentiel : deux fils correspondant à des niveaux complémentaires sont utilisés pour chaque signal ce qui assure, dans tous les cas, une tension différentielle équilibrée et limite l'influence des sources de bruits extérieurs et des masses. Cette norme est utilisée pour des transmissions sur de plus grandes distances et pour des débits plus élevés, et est équivalente à la norme EIA RS422 ; la norme RS485 intègre en plus des circuits trois états permettant des liaisons multipoints avec un maximum de 64 nœuds, elle est fréquemment utilisée dans les réseaux locaux industriels.

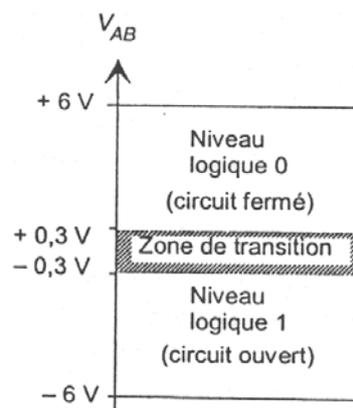


figure 21 : niveaux significatifs

4. Liaison V24 (RS232)

4.1 Définitions

Conçue à l'origine pour la connexion d'équipements avec des réseaux de télécommunication de type analogique (réseau téléphonique), la norme V24 définit les caractéristiques fonctionnelles de la jonction entre un ETTD et un ETCD pour un connecteur 25 broches ISO2110 (DB25).

A chaque broche correspond un circuit, dit *circuit de jonction*, son numéro d'identification, ou numéro de circuit, et sa fonction spécifique. L'avis V24 définit la séquence logique des opérations effectuées à la jonction ETTD/modem en décomposant cette jonction en autant de fils (dits circuits) que de fonctions d'échange à réaliser.

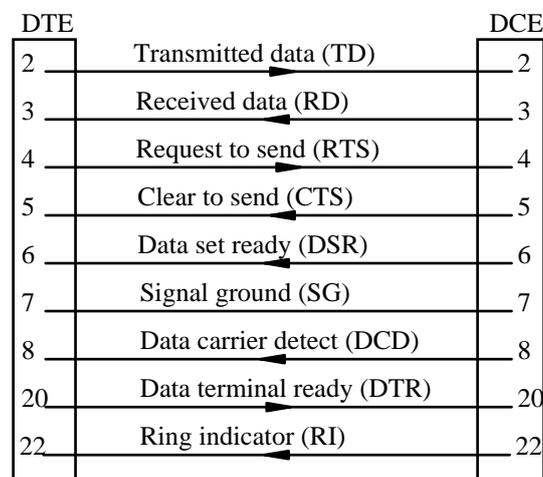


figure 22 : Les principaux circuits V24 (DB 25)

La norme V24 est fonctionnellement équivalente à la norme RS232 ; la norme RS449 (V36) très proche définit les interfaces fonctionnelles et mécaniques pour des transmissions généralement synchrones jusqu'à 2 Mbit/s, elle est associée à la norme V11 sur un connecteur 37 broches (DB37).

Jusqu'à présent, on a considéré que la voie de données était directement utilisable par les terminaux (ETTD) émetteur et récepteur. En fait, les phases suivantes sont nécessaires pour accéder à un circuit de données :

- Etablissement du circuit : si la ligne n'est pas affectée en permanence à la liaison.
- Initialisation : adaptation des modems à la ligne (émission ou détection de la porteuse, synchronisation des horloges).
- Transmission des données.
- Libération du circuit.

Il est ainsi nécessaire d'effectuer des échanges (autres que les données) entre ETTD et MODEM pour l'établissement, l'initialisation et la libération du circuit. Ce dialogue est défini par l'intermédiaire de la jonction normalisée V24.

4.2 Etablissement d'une liaison V24

Les chronogrammes de la figure 14 décrivent les différentes phases d'initialisation et de transfert pour l'émission de données d'un ETTD à travers un ETCD.

Les circuits 105 à 108.2 sont considérés comme fermés lorsque les signaux correspondants sont au niveau logique 0, soit pour des tensions positives sur le câble. Les chronogrammes représentent donc l'évolution des niveaux logiques et non des tensions.

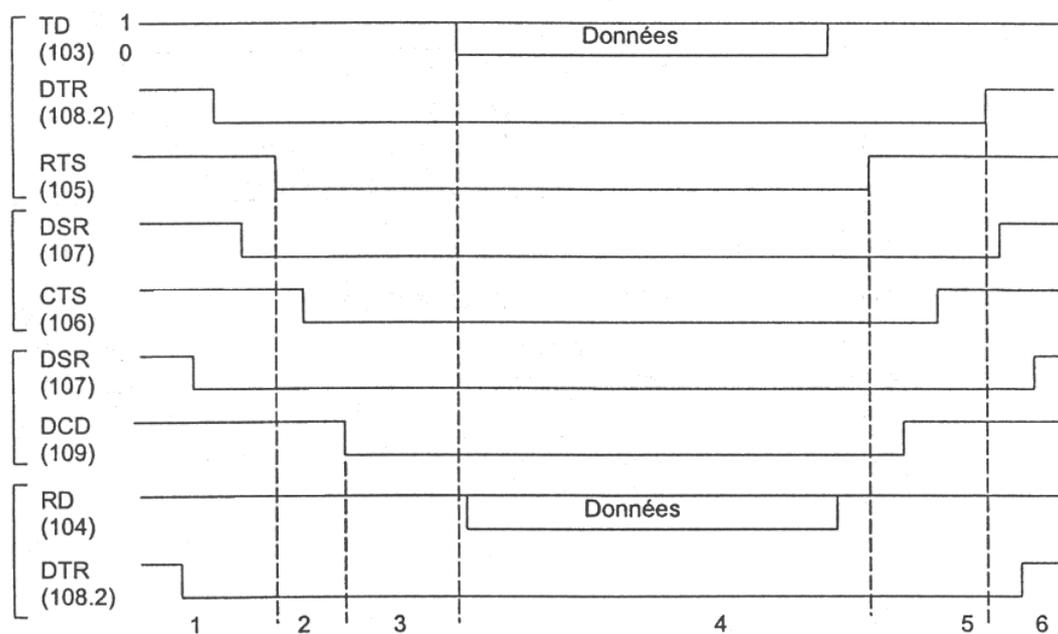


figure 23 : Phases d'établissement d'une liaison V24

- Phase 1 : connexion de ligne sur les systèmes A et B, les signaux DTR et DSR peuvent être validés suite à une procédure de réponse automatique transmise par le circuit 125 (RI).
- Phase 2 : validation de l'émission sur A (RTS=0 et CTS=0), l'ETCD A émet une porteuse sur la ligne (signal d'une fréquence de 1650 Hz pour un modem V21 par exemple).
- Phase 3 : détection de porteuse par l'ETCD B (DCD=0).
- Phase 4 : transmission de données.
- Phase 5 : arrêt de l'émission sur A (RTS=1 et CTS=1).
- Phase 6 : déconnexion de ligne sur A et B (DTR=1 et DSR=1).

Les séquences d'initialisation de l'émetteur et du récepteur sont transposables pour un transfert en duplex intégral, seules les fréquences des porteuses changent suivant le sens de transmission.

4.3 Câblages V24 ou RS232

Les figures 24 à 26 représentent les principaux câblages rencontrés dans une liaison V24. Le seul câblage normalisé correspond à une liaison V24 entre ETTD et ETCD ; dans ce cas le connecteur situé sur l'ETTD doit être de genre mâle, celui de l'ETCD de genre femelle, ce qui impose un câble avec deux connecteurs de genres différents.

La liaison peut être utilisée hors norme pour relier en duplex intégral deux ETTD. Le câble mis en œuvre est dans ce cas de type *null modem* dans la mesure où la liaison ne passe pas par un ET CD. Les signaux de contrôle (DTR/DSR ou RTS/CTS) peuvent alors servir pour la gestion de flux entre les deux ordinateurs.

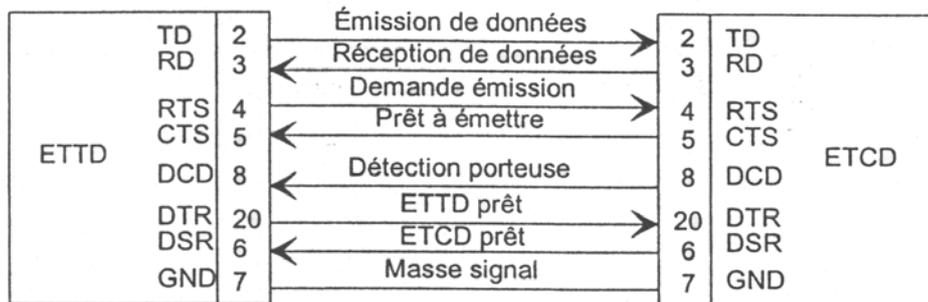


figure 24 : Liaison normalisée ETTD-ETCD

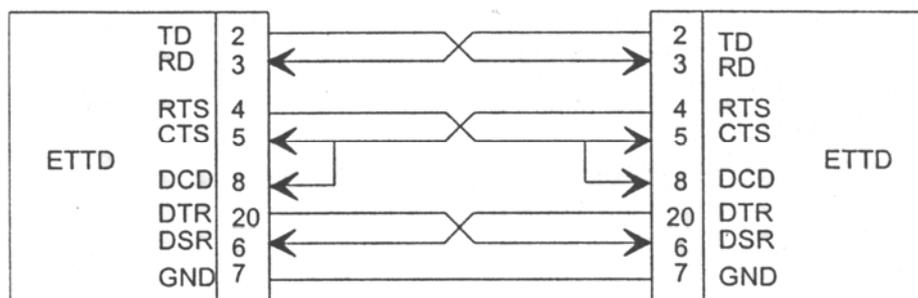


figure 25 : Liaison hors norme Null Modem ETTD-ETCD (DB25)

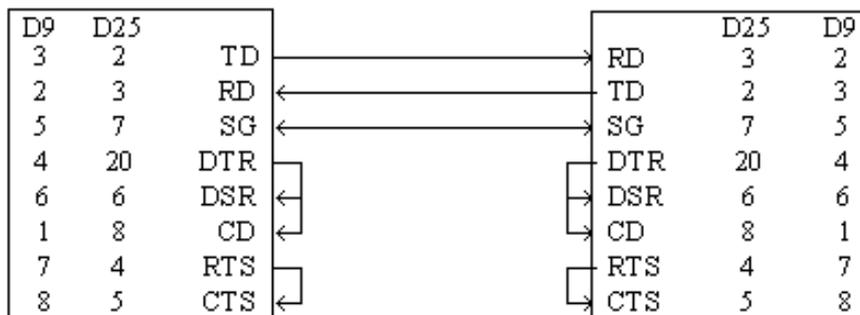


figure 26 : Null Modem un autre câblage

5. Liaison X21

5.1 Définitions

La recommandation UIT-T X21 définit les caractéristiques fonctionnelles de la jonction entre un ETTD et un ETCD pour la connexion d'équipements synchrones à un réseau de type numérique (RNIS, réseaux locaux). L'interface X21 permet des débits plus importants que l'interface V24 (couramment 64 kbit/s), des temps d'établissement plus courts et utilise un nombre limité de circuits. L'adaptation des équipements pourvus d'interfaces V24 aux réseaux numériques synchrones est par ailleurs définie par les procédures de l'avis X21 bis.

La figure 27 présente les différents circuits de la jonction X21.

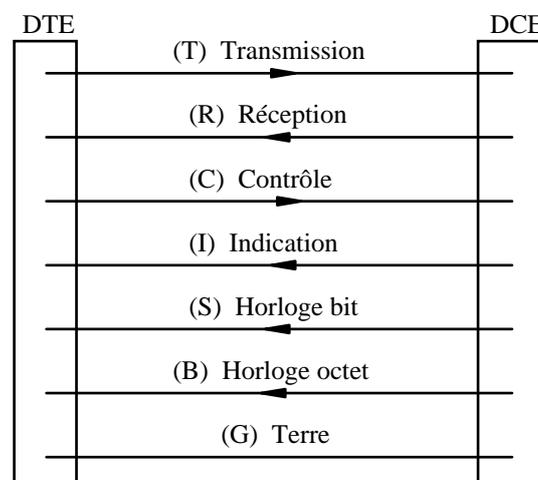


figure 27 : Circuits X21

Les signaux d'horloge S et B fournis par l'ETCD permettent de synchroniser l'ETTD au niveau bit et au niveau caractère; une période d'horloge du signal B correspond à la durée de transmission d'un caractère.

Le contrôle de la liaison se fait à l'aide des signaux de commande C et I, et l'échange de données sur T et R. Suivant les niveaux logiques présents sur ces signaux, l'interface ETTD-ETCD se trouve dans un état défini (prêt, non prêt, demande d'appel...).

A chaque état correspond un niveau logique fixe pour les signaux de contrôle C et I et à l'émission de séquences de 0 et de 1 ou de caractères codés en ASCII pour les signaux de données T et R (contrairement à l'interface V24 où chaque commande est matérialisée par une ligne).

Les différents états sont regroupés en trois phases :

- phase de repos ;
- phase de contrôle d'appel ;
- phase de transfert de données.

Les transitions d'états correspondant aux séquences dans les trois phases sont définies par un diagramme d'états faisant partie de l'avis X21.

TRANSMISSION ASYNCHRONE

1. Principe

La fonction de synchronisation sur une voie de communication a pour but d'assurer que l'information est prélevée par le récepteur aux instants où le signal est significatif. Cette synchronisation doit s'effectuer à deux niveaux :

- niveau bit : à quel instant le bit est-il disponible sur la ligne ?
- niveau bloc : instant de début et fin de bloc. Un bloc est l'unité logique à transmettre, un "message" : par exemple un caractère ou une trame.

En émission, les données et l'horloge sont générées par l'émetteur. En réception l'horloge de synchronisation peut provenir de l'émetteur si celui-ci la transmet sur la ligne ou être interne au récepteur.

Dans le premier cas, on parle de transmission synchrone car l'émetteur et le récepteur sont synchronisés sur la même horloge de référence. Dans le deuxième cas, la transmission est dite asynchrone ou arythmique, le récepteur doit synchroniser sa propre horloge sur la séquence des bits successifs émis.

Le mode asynchrone est orienté pour une transmission par caractères, ceux-ci peuvent être émis à tout moment, la synchronisation à la réception se faisant pour chacun d'eux.

2. Trame asynchrone

Il n'y a pas de référentiel temporel permanent entre l'émetteur et le récepteur, il faut donc que l'émetteur envoie un signal de début de bloc pour indiquer au récepteur le moment où les données pourront être prélevées.

Un caractère émis sur la ligne est donc précédé d'un bit de départ (*start bit*) correspondant à l'état actif (*space*) et à un niveau logique bas ; cette transition haut-bas va indiquer au récepteur qu'un caractère est émis et va permettre sa synchronisation. La fin de l'émission d'un caractère est indiquée par un ou plusieurs bits d'arrêt (*stop bits*) correspondant au niveau logique haut soit à l'état « repos » ce qui permet la distinction avec les bits de départ du caractère suivant. Cette structure est parfois nommée « start-stop ».

Un bit de parité, facultatif, est généré à l'émission et testé à la réception. Deux types de parité existent :

- parité paire (*even*) : la parité est dite paire si le nombre de bits (bits de donnée et bit de parité compris) au niveau logique 1 est pair, le bit de parité est donc positionné dans l'émetteur en conséquence (cas de la figure 28).
- parité impaire (*odd*) : la parité est dite impaire pour un nombre impair de bits à 1.

Le contrôle à la réception consiste à calculer la parité sur le caractère reçu et à la comparer à la valeur du bit transmis par l'émetteur. Il faut donc que le choix de la parité soit le même à l'émission et à la réception.

L'état de « repos » (*mark*) correspond au niveau logique haut (tension négative sur le câble).

La longueur du caractère qui dépend du codage utilisé (ASCII, EBCDIC, Téléx...) est généralement de 7 ou 8 bits, un certain nombre de bits sont associés à chaque caractère pour former une trame. Entre l'émission de deux trames la ligne est au repos pour une durée quelconque.

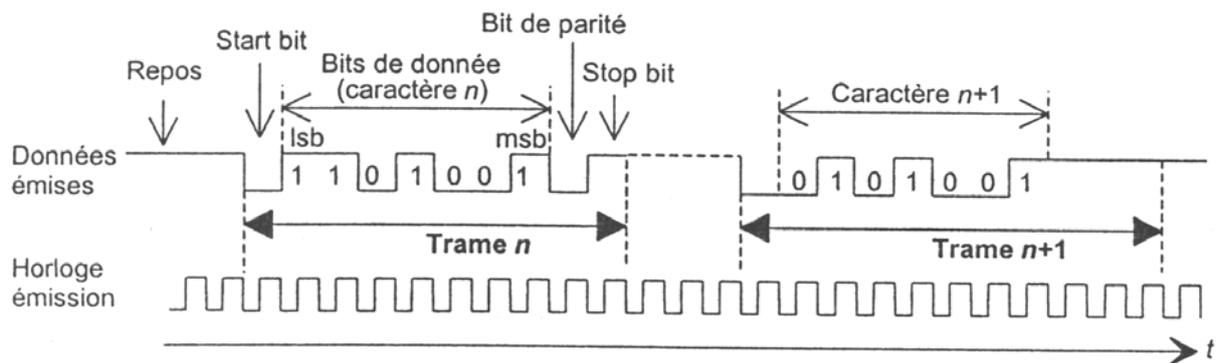


figure 28 : Trame asynchrone

Les horloges de l'émetteur et du récepteur auront la même fréquence.

A cause de la dérive des horloges, il n'est pas possible de transmettre de longues suites binaires (la taille des blocs est de 10 bits maximum) en effet, la durée entre chaque bit étant constante et la synchronisation se faisant sur le bit de départ, le déphasage entre l'horloge de réception et les instants correspondant aux changements de bits est d'autant plus grand que ces derniers sont éloignés du bit de départ et que la fréquence de l'horloge de réception est éloignée de celle de l'horloge d'émission. Ceci limite d'une part, le nombre de bits par trame et d'autre part, les vitesses de transmission.

Vitesses de transmission courantes (en bit/s) : 75 – 110 – 150 – 300 – 600 – 1200 – 2 400 – 4800 – 9600 – 19200 – 28800 – 56600.

Il est à remarquer que ces débits ne correspondent pas aux vitesses effectives de transmission des informations dans la mesure où chaque caractère est encadré par plusieurs bits de contrôle (dans un codage ASCII sur 7 bits avec 1 bit de départ, 1 bit de parité et 1 bit de stop, 10 bits sont transmis pour 7 utiles).

3. Codage des caractères

Le principal code utilisé en transmission asynchrone est le code ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) défini par l'ANSI (*American National Standard Institution*).

Le code ASCII, défini au départ sur 7 bits, permet de coder 128 caractères, les 32 premiers sont des caractères de contrôle pour terminaux ou imprimantes (saut de ligne, tabulation...) ou utilisés pour une gestion de flux logicielle, les 96 suivants sont des caractères alphanumériques.

Le code ASCII étendu à 8 bits est le plus utilisé, il donne accès à un jeu supplémentaire de caractères graphiques ou alphanumériques spécifiques (italiques, accentués...).

4. Protocoles asynchrones

Dans les transmissions asynchrones, les protocoles utilisés pour le transfert de fichiers se situent à 3 niveaux différents. Tout d'abord, les protocoles de contrôle de flux sur la ligne de transmission sont utilisés pour le transfert des octets au niveau de la gestion de la connexion (figure 30). D'autre part, des protocoles pour la gestion de la communication et la transmission des fichiers sont utilisés au niveau des applications de transfert de fichier.

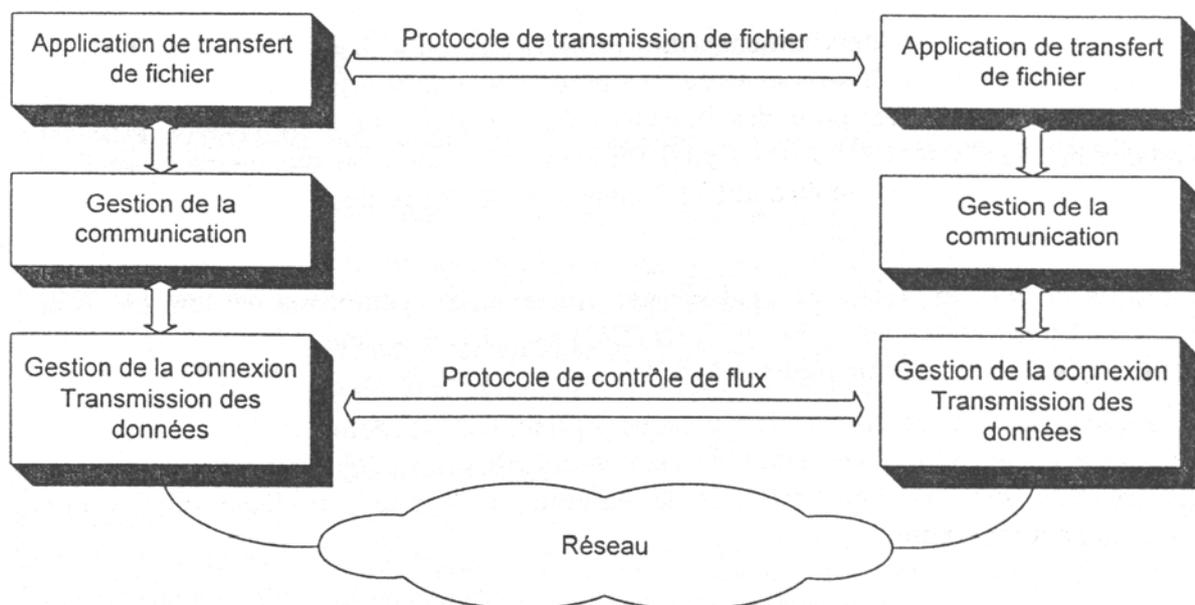


figure 30 : protocoles utilisés en transmission asynchrone

4.1 Protocoles de contrôle de flux

Dans une liaison série asynchrone, lorsque les données reçues par le récepteur ne peuvent être exploitées aussi rapidement qu'elles sont émises, une procédure spécifique signifiant à l'émetteur de suspendre provisoirement son émission est nécessaire.

Le récepteur dispose alors d'une mémoire tampon permettant le stockage au rythme de l'émission avant traitement.

Lorsque cette mémoire est saturée, le récepteur doit demander à l'émetteur de suspendre l'émission. Il devra également demander la reprise d'émission lorsque la mémoire tampon sera libérée, après traitement des données mémorisées.

Cette gestion du flux de données entre l'émetteur et le récepteur est définie par des protocoles. Certains dits matériels utilisent les signaux de contrôle des circuits V24 dans le cadre d'une liaison hors norme entre deux ETTD, d'autres dits logiciels emploient des caractères de contrôle ASCII.

4.1.1 Protocole matériel RTS/CTS (DTR/DSR)

Le contrôle de flux matériel est réalisé entre les deux ETTD par les signaux RTS et CTS. Lorsque le tampon du récepteur est « presque » plein, il désactive le signal RTS (ouverture du circuit correspondant). La reprise de l'émission sera signalée par un nouveau changement d'état du signal RTS, lorsque le tampon sera « presque » vide.

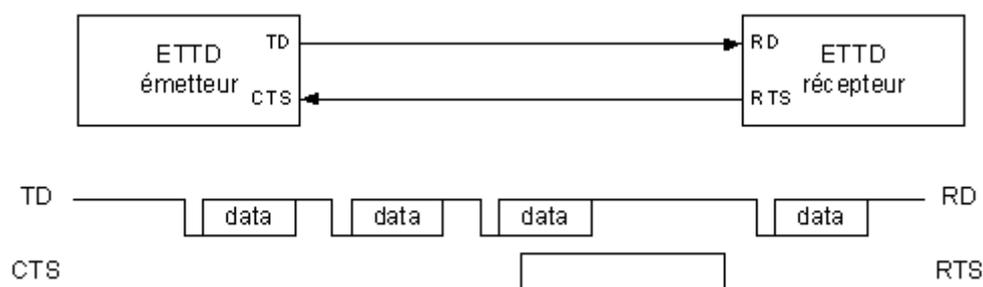


figure 31 : Protocole RTS/CTS

Les changements d'état interviennent avant remplissage ou vidage complet du tampon pour minimiser les temps morts et éviter les pertes éventuelles de données. Ce type de protocole peut fonctionner pour des liaisons « *half-duplex* » et implique une prise en compte d'un changement d'état du signal CTS par scrutation ou par interruption. Les signaux DTR et DSR peuvent être utilisés suivant le même principe.

4.1.2 Protocole logiciel Xon/Xoff

La gestion de flux logicielle est réalisée par émission des caractères de contrôle Xon (DC1 ou Ctrl+Q, valeur hexadécimale 11) et X off (DC3 ou Ctrl+S, valeur hexadécimale 13), la liaison doit être «full duplex ».

Lorsque le tampon du récepteur est « presque » plein, celui-ci demande la suspension de l'émission en renvoyant à l'émetteur le caractère Xoff sur sa ligne TD. L'émission du caractère Xon sur TD signifiera que le tampon est à nouveau disponible et que l'émission peut reprendre.

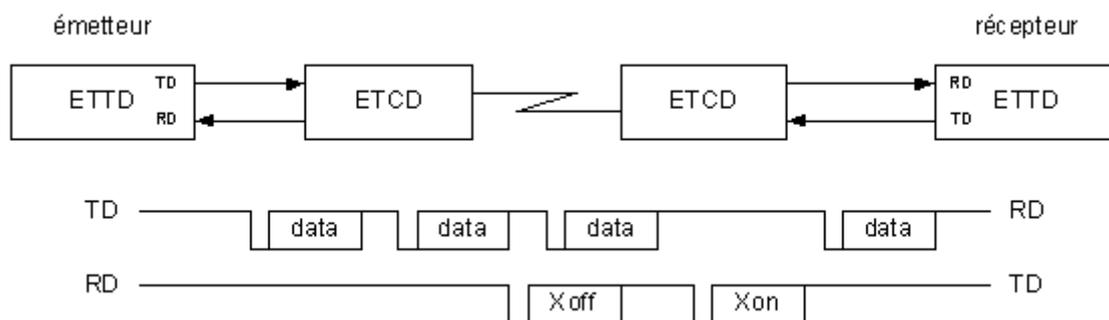


figure 32 : Protocole Xon/Xoff

Ce protocole suppose une analyse par l'émetteur des caractères en retour. De ce fait, les suspensions et reprises d'émission sont moins rapides que dans le protocole RTS/CTS.

4.2 Protocoles de transfert de fichiers

D'autres protocoles logiciels utilisant les caractères de contrôle sont employés pour la transmission par modem de fichiers ASCII ou binaires entre deux systèmes. Ces protocoles réalisent le découpage du fichier en blocs, leur transmission, le test de l'intégrité des blocs à la réception avec une possibilité de retransmission en cas d'erreur, et la reconstitution du fichier (les caractères de chaque bloc peuvent être transmis suivant un protocole de niveau inférieur de type DTR/DSR ou Xon/Xoff).

Les plus courants sont les protocoles Kermit, Xmodem, Ymodem et Zmodem ; les deux derniers, les plus utilisés, sont des versions améliorées de X modem dont ils reprennent les principes de base.

La figure 33 décrit la structure d'un bloc conforme au protocole Xmodem. Les trois premiers octets définissent le début de bloc, le numéro du bloc et son complément à 255.

Les données sont suivies d'une somme de contrôle (*checksum*) sur un octet, calculée en additionnant les octets de donnée (modulo 256).

SOH	N° bloc	255-n° bloc	Données (128 octets)	Checksum
-----	---------	-------------	----------------------	----------

figure 33 : structure d'un bloc Xmodem

La figure 34 décrit l'algorithme de transmission d'un fichier découpé en blocs. La détection des erreurs intervient d'une part, au niveau de la gestion des numéros de blocs (test du numéro de bloc et de son complément à la réception) et d'autre part, au niveau du calcul des sommes de contrôle (la somme calculée à la réception doit être égale à la somme émise) ; si après dix tentatives de rémission d'un bloc erroné les erreurs persistent, alors le transfert est suspendu.

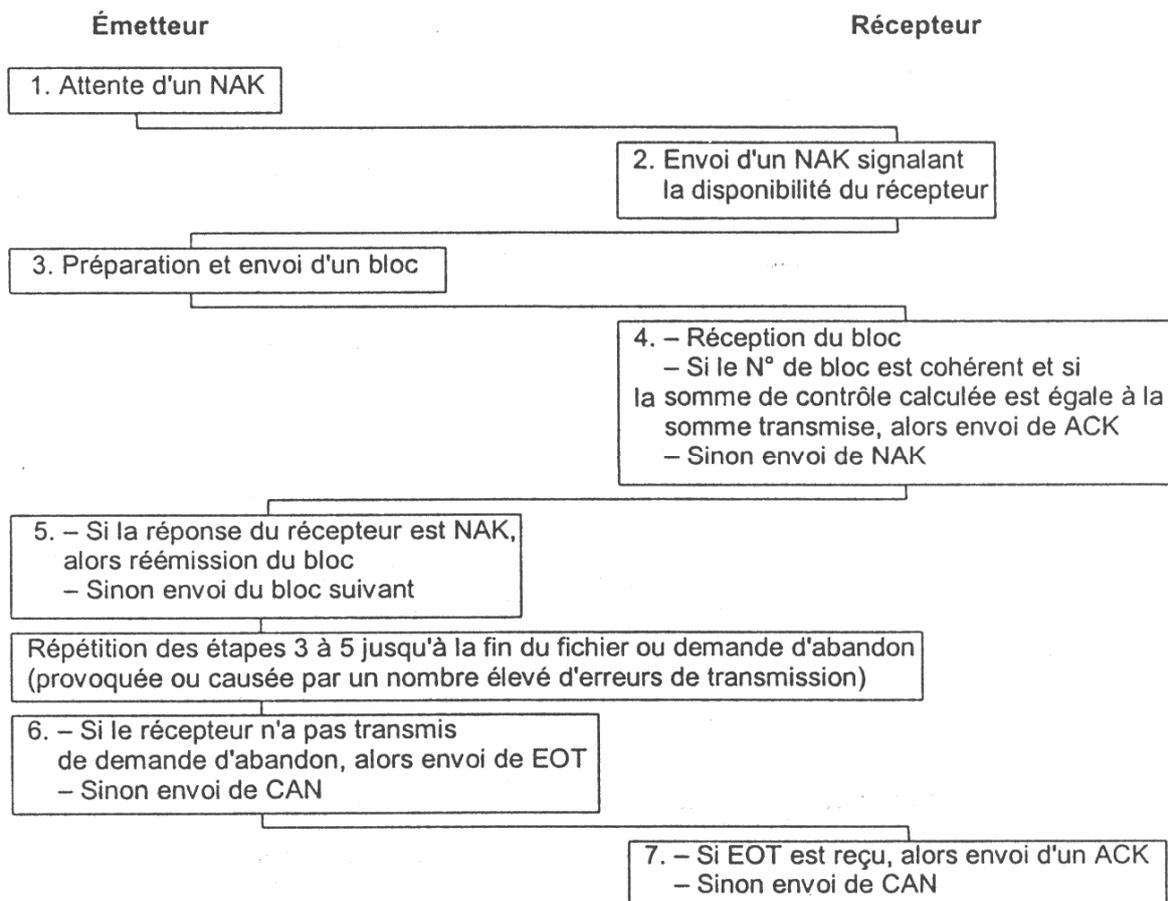


figure 34 : Algorithme d'un transfert Xmodem

Les protocoles Ymodem et Zmodem apportent quelques améliorations parmi lesquelles :

- taille des blocs étendue (1024 octets pour Ymodem. variable pour Zmodem) ;
- test d'erreur par code de redondance cyclique (CRC sur 16 bits) ;
- transfert des caractéristiques du fichier (nom, date, taille) ;
- transmission de plusieurs fichiers dans une même session ;
- reprise du transfert sur interruption (Zmodem seulement).

TRANSMISSION SYNCHRONE

1. Principes

Lors d'une transmission synchrone, le signal d'horloge de l'émetteur est transmis sur la ligne au récepteur ou reconstitué par ce dernier, ce qui évite une nouvelle synchronisation en réception et garantit des instants d'échantillonnage en phase quelle que soit la position relative du bit dans la séquence.

En pratique, l'horloge de synchronisation en réception peut être élaborée de plusieurs façons :

- directement à partir de l'horloge d'émission si celle-ci est transmise sur une ligne séparée, cas des transmissions synchrones en bande de base ou par modem sur quatre fils ;
- par reconstitution dans le modem de l'horloge d'émission à partir des instants de transition du signal de données et suivant le type de modulation ;

Dans la mesure où la fréquence de l'horloge d'émission est rigoureusement égale à celle de l'horloge de réception, les débits peuvent être plus importants. De même la longueur des trames n'est plus limitée à un caractère comme pour la transmission asynchrone mais est quelconque. En transmission synchrone, une trame est donc composée d'un ensemble de bits pouvant être regroupés par caractères ou octets.

Il est nécessaire d'utiliser, en plus des trames de données, des trames spécifiques dites de supervision et de contrôle. Ces trames devront permettre d'établir et de libérer la liaison, de préciser l'adresse du ou des destinataires, d'acquitter ou de rejeter les trames émises, de contrôler le flux des trames d'information...

Les protocoles ou procédures utilisées pour les phases d'établissement, de transmission et de libération sont liées au type de réseau et de données échangées. La procédure HDLC est utilisée notamment dans le réseau X25. La recommandation SDH (SONET aux États-Unis) définit une norme commune de signalisation, de structure de trames et de multiplexage pour les équipements d'extrémité des canaux numériques (ATM, RNIS large bande...).

2. Modes de liaison

La transmission synchrone peut être associée à des liaisons point à point lorsque la voie de transmission relie deux stations, ce type de liaison est utilisé dans l'accès aux réseaux maillés comme les réseaux à grande distance (réseaux d'opérateurs X25, ATM, RNIS) ; ou en mode multipoint lorsque la voie relie plus de deux stations qui se partagent le support physique (réseaux locaux). dans ce type de liaison, il est nécessaire de prévoir un champ adresse pour identifier les stations les unes des autres.

Dans ce qui suit, on ne va s'intéresser qu'aux liaisons en mode bipoint, c'est-à-dire entre deux stations directement connectées l'une à l'autre. Aussi les fonctions de désignation (adressage) ne seront pas développées ici, elles seront traitées dans le cours réseaux lors de l'étude des protocoles de liaison spécifiques aux réseaux locaux.

2.1 Modes de communication bipoint

Pour classer les modes de communication possibles entre deux stations, on définit deux types de statuts pour les stations :

- Les statuts **permanents** qui sont liés au contrôle : on appelle **station primaire**, la station qui supervise la communication ; l'autre station, qui est tributaire de ce contrôle, est dite **station secondaire** (figure 25). La supervision est réalisée par l'envoi de trames de commandes par la station primaire, la station secondaire y répondant par l'envoi de trames de réponses.
- Les statuts **temporaires** qui sont liés au sens de transmission des informations et peuvent donc changer au cours de la communication. A chaque instant de la communication, la station qui émet l'information est appelée **source**, et la station qui reçoit l'information est le **puits** (figure 35).

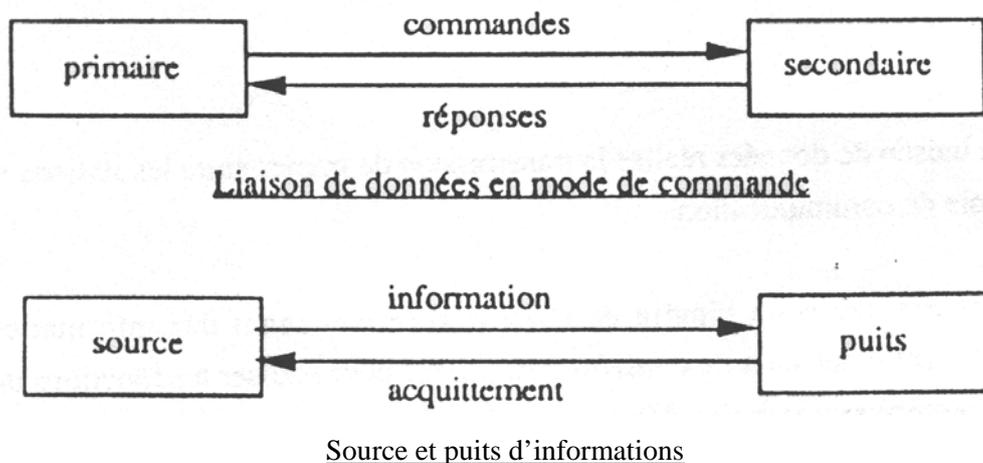


figure 35 : les statuts permanents et temporaires des stations

Il y a deux façons d'organiser le contrôle sur une liaison duplex :

- Soit la liaison est **non équilibrée** : une station est primaire pour les deux sens du transfert d'information.
- Soit la liaison est **équilibrée** : chaque station est primaire pour le sens de transmission dans lequel elle est émettrice d'information (figure 36).

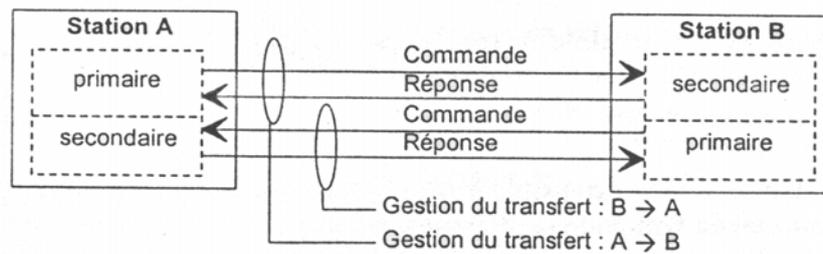


figure 36 : Liaison équilibrée

Dans le mode de liaison non équilibré ou mode **LAP** (*Link Access Procedure*), une seule station, toujours la même, assure la gestion de la transmission et est susceptible d'émettre des trames de commande : c'est la station primaire. La station secondaire émet des réponses aux commandes de la station primaire.

Dans le mode équilibré ou mode **LAPB** (*Balanced Link Access Procedure*) utilisé notamment sur les réseaux X25, chaque station possède une fonction primaire et une fonction secondaire. Les trames de commande et d'information peuvent être échangées simultanément, ce qui permet une exploitation en duplex intégral.

3. Les procédures (ou protocoles) de liaison de données

Une procédure de liaison est l'ensemble des règles qui définit la construction et la reconnaissance des messages (codage/décodage, structure en trames, bits de contrôle...) permettant la détection des erreurs, ainsi que les règles d'initialisation et de fermeture de la transmission et celles de reprise sur erreurs.

Différentes techniques sont utilisées dans les procédures de liaison pour réaliser les fonctions de transmission (telles qu'elles ont été définies par l'ISO) :

- La détection des erreurs est effectuée par :
 - la structuration des messages en trames,
 - l'utilisation de codes de détection d'erreur,
 - la numérotation des trames (qui permet aussi d'assurer un séquençement correct en réception).
- La récupération des erreurs est effectuée par :
 - l'envoi d'acquiescements positifs ou négatifs,
 - la réémission des trames détectées incorrectes.
- Les initialisations nécessaires pour la synchronisation des partenaires et la numérotation sont réalisées à partir d'échanges de trames de contrôle (trames de connexion, de réinitialisation et de déconnexion de la liaison).

- Le contrôle de flux est réalisé par la numérotation des trames et par des échanges de trames de contrôle permettant de connaître l'état du partenaire.

La principale et la plus complexe des fonctions à réaliser par les procédures de liaison est le contrôle d'erreur (détection et récupération des erreurs de transmission). C'est la principale raison pour laquelle les messages sont découpés en blocs (trames) de taille bornée sur lesquels un contrôle d'erreur par CRC (Cyclic Redondancy Check) ou FCS (Frame Check Sequence) est défini.

3.1 Détection et correction des erreurs

Quelle que soit la qualité d'une ligne de transmission, la probabilité d'apparition d'erreurs est non nulle (ne serait-ce qu'à cause du bruit thermique). Pour certains types de transmissions des erreurs groupées peuvent apparaître, par exemple à cause de parasites électromagnétiques pour les transmissions sur paires torsadées non blindées ou de conditions atmosphériques pour les transmissions par satellite. Si pour certaines données, comme par exemple le texte d'un télégramme, les erreurs ponctuelles ne sont pas très gênantes (le texte reste compréhensible), pour d'autres, comme les transactions financières, elles sont inacceptables. Les erreurs groupées sont inacceptables quel que soit le type de données. La détection et la correction des erreurs est donc indispensable.

La détection et la correction des erreurs est fondée sur l'utilisation d'une information redondante transmise avec l'information utile. L'ajout de cette information redondante est obtenu par un recodage. Selon le degré de redondance des codes employés, un degré de détection et/ou de correction peut être atteint. Pour la correction, deux possibilités se présentent : les codes sont suffisamment redondants pour corriger, ou les codes permettent uniquement la détection et les informations erronées sont retransmises.

Un **mot de code** est une suite de bits constituée des bits d'information et des bits de contrôle qui leur sont associés : c'est cette suite complète "information + contrôle" qui est émise.

Remarque importante : on ne peut pas être sûr qu'un message reçu est correct quelque soit le code employé, il ne peut pas détecter toutes les erreurs possibles. Par conséquence, les codes choisis dans une situation particulière sont ceux qui détectent le mieux et éventuellement corrigent les erreurs les plus fréquentes dans la situation en question.

3.1.1 Codes polynomiaux

La suite de données à transmettre est décomposée en blocs de taille fixe, et à chaque bloc, un codeur associe une séquence de bits de contrôle émis à la suite du bloc.

A un bloc binaire quelconque nous associons un polynôme à coefficients dans $\{0,1\}$. Par exemple à $a_{m-1} \dots a_1 a_0$ (m bits) nous associons $q(x) = a_{m-1}x^{m-1} + \dots + a_2x^2 + a_1x + a_0$ (de degré maximum $m-1$). Par exemple :

la suite binaire suivante : 1 0 1 1 0 0 1 1

correspond au polynôme : $1.x^7 + 0.x^6 + 1.x^5 + 1.x^4 + 0.x^3 + 0.x^2 + 1.x^1 + 1.x^0$

que l'on peut noter : $x^7 + x^5 + x^4 + x + 1$

Les opérations effectuées sur ces polynômes sont faites modulo 2. On peut remarquer que les opérations d'addition et de soustraction sont les mêmes. Par exemple :

$$(x^3 + x + 1) + (x^2 + x + 1) = (x^3 + x^2)$$

La première étape est la définition d'un polynôme connu de l'émetteur et du récepteur, appelé **polynôme générateur** car c'est lui qui définit le code utilisé. Soit r son degré :

$G(x) = x^r + \dots + 1$; il faut que les termes des deux extrêmes soient non nuls (x_r, x_0).

A l'émission, pour chaque message M à émettre (de m bits), dont le polynôme correspondant est $M(x)$ de degré $m-1$, on ajoute r bits (appelés bits de contrôle, CRC ou FCS) pour envoyer une trame de n bits dont le polynôme correspondant $P(x)$ de degré $n-1$, est divisible par $G(x)$. Par définition, on a : $n = m + r$. La figure 37 décrit les différentes parties d'une trame ainsi constituée.

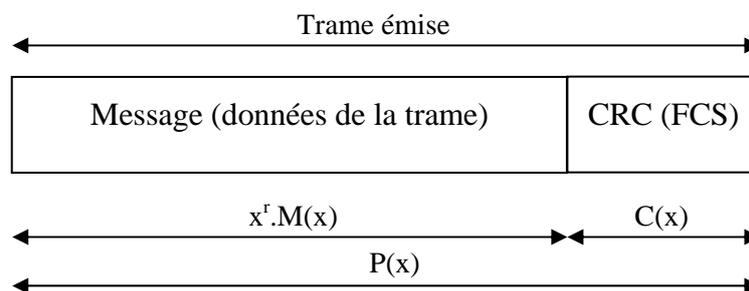


figure 37 : Trame avec contrôle et polynômes correspondants

En réception, si le mot reçu est divisible par $G(x)$, on va considérer que la transmission s'est effectuée correctement, sinon, on a détecté une erreur.

La trame émise (mot $P(x)$) est constituée de la concaténation du message M avec le champ contrôle d'erreur CRC (ou FCS), dont le polynôme correspondant $C(x)$ est calculé à l'aide de $G(x)$ suivant la méthode (figure 38) :

- on multiplie $M(x)$ par x^r : on a le polynôme $x^r.M(x)$ de degré $m + r - 1 = n - 1$;
- on divise $x^r.M(x)$ par $G(x)$, soit $x^r.M(x) = Q(x).G(x) + C(x)$;
- $C(x)$ est le reste de cette division, par définition son degré est $r - 1$;
- on envoie le mot $P(x) = x^r.M(x) + C(x)$, c'est-à-dire les m bits de M suivis des r bits de CRC. Le polynôme $P(x)$ est par construction divisible par $G(x)$, car :

$$P(x) = x^r.M(x) + C(x)$$

$$\text{or } x^r.M(x) = Q(x).G(x) + C(x)$$

et $C(x) + C(x) = 0$ puisque les coefficients sont définis modulo 2 (disjonction),

$$\text{donc } P(x) = Q(x).G(x).$$

Exemple :

$$M(x) \text{ de degré } m-1 = 5 \quad 100101$$

$$G(x) \text{ de degré } r = 4 \quad 10011$$

Quelle est la valeur de $C(x)$?

Quelle est la valeur de $P(x)$?

$$M(x) = x^5 + x^2 + 1$$

$$G(x) = x^4 + x + 1$$

$$M(x).x^r = x^9 + x^6 + x^4$$

$[x^4.M(x)]$	$\begin{array}{r} x^9 + x^6 + x^4 \\ x^9 + x^6 + x^5 \\ \hline x^4 + x^5 \\ x^5 + x^2 + x \\ \hline x^4 + x^2 + x \\ x^4 + x + 1 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} x^4 + x + 1 \\ \hline x^5 + x + 1 \end{array}$	$[G(x)]$ $[Q(x)]$
$[C(x)]$	$\begin{array}{r} x^2 + 1 \\ 0101 \end{array}$		

figure 38 : exemple de division polynomiale

$$C(x) = x^2 + 1$$

$$P(x) = x^4.M(x) + C(x)$$

$$P(x) = x^9 + x^6 + x^4 + x^2 + 1 : \quad 100101 \ 0101$$

A la réception, chaque mot reçu $M'(x)$ est divisé par le polynôme générateur $G(x)$.

- Un reste non nul indique qu'il y a eu erreur lors de la transmission $M'(x) / G(x) \neq 0$.
- Un reste nul indique qu'il n'y a pas eu d'erreurs $M'(x) / G(x) = 0$

Cependant si l'erreur produit un polynôme multiple de $G(x)$, le reste sera nul et cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas eu d'erreurs. Il y a donc toujours subsistance d'erreurs dites résiduelles.

3.1.2 Codes normalisés

L'avis V41 du CCITT conseille l'utilisation de codes polynomiaux (de longueurs $n=260, 500, 980$ ou 3860 bits) avec le polynôme générateur $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$.

(Le polynôme CRC-16 est utilisé par le protocole HDLC :

$$G(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1.$$

Le polynôme suivant est utilisé par Ethernet :

$$G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + 1.$$

Les opérations de divisions polynomiales décrites ci-dessus sont réalisées en pratique par hardware.

3.2 Principes des procédures en ligne

Il faut pouvoir échanger entre les stations des trames de commande et de supervision destinées à assurer la gestion de la liaison. Le fonctionnement de la liaison de données doit donc être régi par un ensemble de règles qui définissent la façon dont les informations de commande et de supervision sont codées, et qui permettent de séparer le texte des informations de commande et de supervision. Ces règles, qui constituent la procédure de ligne, doivent également préciser la séquence des trames échangées entre les stations. Les procédures de ligne se divisent en deux groupes principaux selon que l'information est codée sous forme de caractères ou sous forme de trames.

Avec les *procédures orientées caractère*, dont la plus connue est la procédure BSC (*Binary Synchronous Communication*), l'information est codée selon un alphabet bien déterminé, dans lequel certains caractères sont réservés à des commandes de contrôle et de supervision qui indiquent par exemple le début de texte ou un acquittement. Les *procédures orientées bit* utilisent un codage de position qui dispose l'information dans des trames dont les divers champs contiennent le texte ainsi que les données de contrôle et de supervision.

Le début et la fin de la trame sont délimités par des fanions constitués par une suite unique de bits. Les procédures orientées bit les plus connues sont les procédures HDLC (*High-Level Data Link Control*) et SDLC (*Synchronous Data Link Control*).

La fonction principale d'une procédure de ligne est d'assurer un échange ordonné des trames entre les stations, tout en garantissant aux fonctions supérieures du système un taux d'erreurs très faible. D'autre part, comme les coûts de transmission sont en général importants et comme les débits sont limités, la procédure de ligne doit être conçue pour minimiser le temps de réponse du système et pour exploiter la ligne avec un rendement maximum. Ceci conduit à réduire autant que possible l'importance des informations de commande et de supervision par rapport au texte.

Dans une liaison point à point, il n'y a aucune ambiguïté sur l'origine et la destination d'une trame, et dans une liaison multipoint, il suffit pour lever toute ambiguïté que les trames émises par le primaire comportent l'adresse du destinataire et que les trames émises par les secondaires comportent l'adresse de l'émetteur.

3.2.1 Procédure envoyer attendre

En pratique, la plupart des procédures de ligne actuellement employées sont basées sur l'utilisation des codes détecteurs d'erreurs pour que la station réceptrice puisse s'assurer de la validité du message reçu. Il suffit alors que la station réceptrice indique à la station émettrice si la trame était correcte ou non. Nous décrivons d'abord ici la procédure la plus simple, de type *envoyer et attendre* (*Stop and Go, Send and Wait*) basée sur ce principe.

Avec cette procédure, la station A envoie à la station B une trame $m1$ à laquelle elle adjoint un mot CRC de contrôle d'erreurs (figure 39). Si la station B ne détecte pas d'erreurs dans la trame $m1(\text{CRC})$, elle considère qu'elle est correcte et transmet $m1$ à l'équipement informatique qui lui est connecté. D'autre part, B retourne à A une trame *d'acquiescement positif* ACK (*Acknowledgement*) pour lui indiquer que la transmission s'est effectuée avec succès. Après réception de ACK, la station A peut envoyer la trame suivante $m2$.

En cas d'erreurs de transmission, la station B retourne à A un *acquiescement négatif* NAK (*Negative Acknowledgement*), ce qui conduit cette dernière à retransmettre $m2$. Dans ce type de procédure la station réceptrice délivre les trames à l'équipement informatique qui lui est connecté au bout d'un temps $T1$, les trames d'acquiescement n'ont à transmettre qu'une information binaire et peuvent donc être beaucoup plus courtes que les trames de texte, ce qui se traduit par un temps de transmission $T2$ de B vers A.

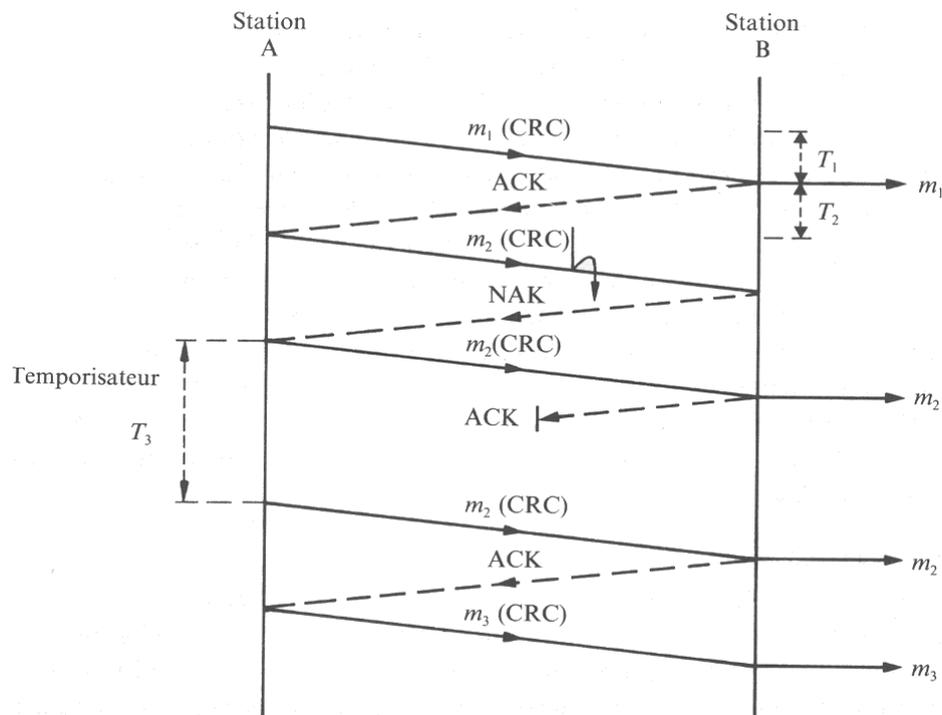


figure 39 : transmission point à point envoyer attendre

Jusqu'ici, nous n'avons considéré que le cas où les erreurs de transmission modifient le contenu de la trame. En pratique, la ligne peut subir des coupures temporaires ou présenter un taux d'erreurs suffisamment élevé pour que les trames ne soient plus reconnues comme telles. Pour prendre en compte le cas des trames perdues, la méthode généralement utilisée consiste à enclencher au moment de l'émission de chaque trame m_i un *temporisateur*, dont le temps de garde $T_3 \geq T_1 + T_2$. Si la station émettrice A ne reçoit pas d'acquittement de la trame m_i durant la *fenêtre* T_3 elle en déduit que la trame est perdue et elle la retransmet. Cette méthode fonctionne correctement lorsque la trame de texte a été effectivement perdue, mais pas lorsque c'est l'acquittement qui a été perdu. En effet, dans ce dernier cas, la station B a reçu correctement la trame m_i . Elle la transmet donc à son équipement informatique et attend la trame $m_i + 1$. Comme la station A ne reçoit pas d'acquittement pendant la fenêtre T_3 elle en déduit que la trame m_i a été perdue et la retransmet, ce qui amène la station B à envoyer deux fois de suite m_i à son équipement informatique, ce qui se traduit par la duplication de m_i .

3.2.2 Procédure envoyer attendre avec numérotation des trames (modulo2)

Pour surmonter les difficultés causées par les retransmissions liées aux pertes de trames, la solution la plus simple consiste à numérotter les trames transmises. Si nous adoptons une numérotation modulo 2 permettant de distinguer entre trames paires et impaires, toute trame retransmise peut être distinguée par la station réceptrice grâce au fait qu'elle a la même

parité que la trame précédente. En effet, si nous reprenons l'exemple précédent, mais avec une numérotation binaire des trames (figure 40), la trame m_2 numérotée 1 est reçue correctement par la station A et transmise par celle-ci à l'équipement informatique. La trame d'acquittement positif correspondante ACK est perdue, ce qui amène A à retransmettre m_2 avec le même numéro de séquence. Cette trame est reçue correctement par B qui s'attendait à recevoir la trame m_3 de numéro 0. La station B en conclut donc qu'elle vient de recevoir une retransmission de m_2 et retourne un acquittement positif tout en s'interdisant d'envoyer une seconde fois m_2 à son équipement informatique. Le problème des répétitions est donc éliminé.

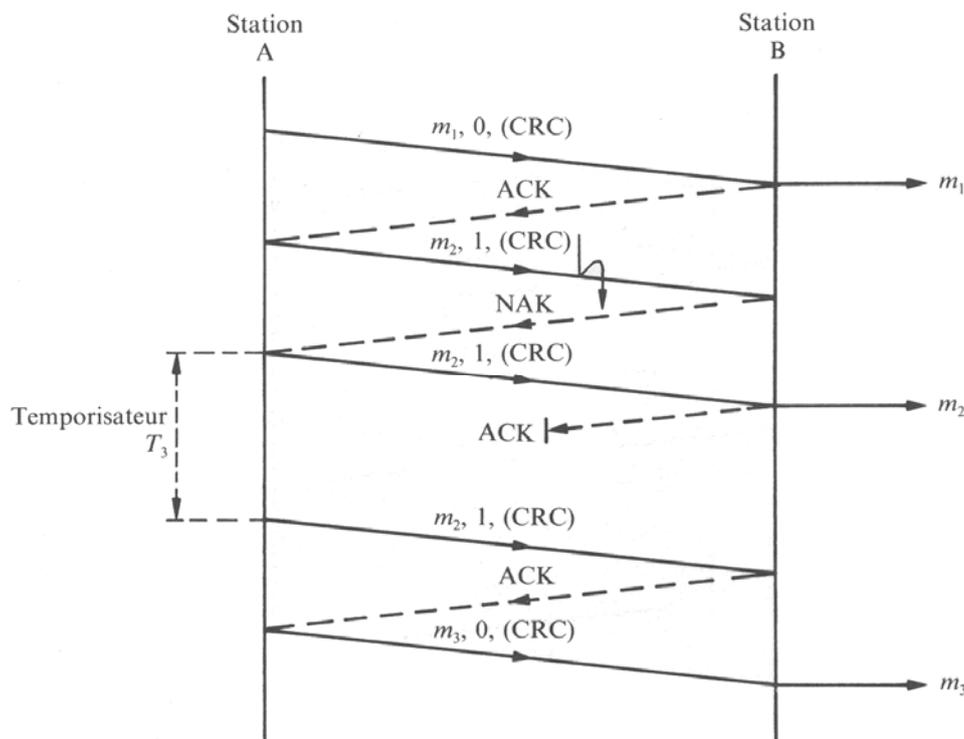


figure 40 : procédure envoyer attendre avec numérotation modulo 2

Dans ce cas les acquittements négatifs NAK ne sont pas indispensables, puisque la non réception d'un acquittement au bout du temps T_3 suffit à déclencher une retransmission. Cette méthode avec *gestion passive* sans acquittement négatif présente le désavantage de ralentir le rythme de transmission, car T_3 est nécessairement sensiblement supérieur à $T_1 + T_2$. Elle est cependant plus utilisée que la procédure avec *gestion active* qui met en oeuvre des acquittements négatifs, car elle est plus robuste vis à vis des erreurs de transmission. Elle permet en particulier d'éliminer les problèmes posés par une erreur qui transforme un acquittement positif en acquittement négatif ou vice-versa.

3.2.3 Procédure à fenêtre coulissante

Afin d'améliorer considérablement l'exploitation du canal des modifications sont introduites par rapport à la procédure envoyer et attendre, qui sont, l'anticipation des acquittements et le groupement des acquittements et la gestion du canal en bidirectionnel.

L'*anticipation des acquittements* est une technique qui consiste à ne pas attendre l'acquittement d'une trame avant d'envoyer les trames suivantes. L'expéditeur peut envoyer plusieurs trames d'information en anticipant les acquittements positifs qu'il compte recevoir. Il doit conserver en mémoire une copie de toutes les trames qu'il vient d'envoyer, afin de retransmettre éventuellement celles qui auraient subi une erreur de transmission. Les trames d'information sont numérotées en séquence, de façon à ce que l'expéditeur puisse déterminer celles acquittées par les trames d'accusé de réception qu'il reçoit et libérer les tampons correspondants. L'expéditeur maintient une *variable d'état émission* $V(S)$ qui désigne le numéro de la prochaine trame de texte à transmettre, et qui est incrémentée de 1 immédiatement après l'expédition de la trame. Chaque trame d'information expédiée contient un *numéro de séquence émission* $N(S)$ (*Send Number*) qui est égal à la valeur courante de $V(S)$ au moment de l'émission. D'une façon symétrique, le récepteur maintient une *variable d'état réception* $V(R)$ qui désigne le numéro de séquence de la prochaine trame attendue. Cette variable est incrémentée de 1 chaque fois qu'une trame d'information est reçue sans erreur. Cette valeur de la variable d'état réception est reportée dans un *numéro de séquence réception* $N(R)$ (*Receive Number*) transporté par l'acquittement retourné à l'expéditeur.

Le numéro de séquence réception $N(R)$ contenu par l'accusé de réception permet d'acquitter toutes les trames d'information dont le numéro de séquence émission $N(S)$ est égal ou inférieur à $N(R)-1$. C'est la méthode de *groupement des acquittements*, et permet de réduire le nombre d'acquittements expédiés sur la ligne (figure 30). La cohérence initiale entre les numéros de séquence émission et réception est assurée en imposant des valeurs nulles à $N(R)$ et $N(S)$ au moment de l'établissement de la liaison.

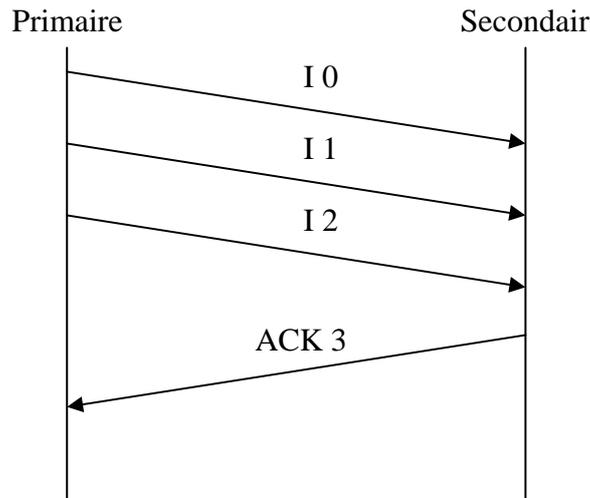


figure 41 : Anticipation des acquittement et acquittements groupés

Les techniques présentées précédemment constituent les principaux éléments d'une **procédure à fenêtre coulissante** (*Sliding Window Protocol*), mais il subsiste tout de même quelques rectifications à signaler. Nous avons jusqu'ici supposé que la séquence des numéros de trame est infinie, ce qui permet de repérer chaque trame d'information de façon unique et d'en assurer l'acquittement sans ambiguïté. En pratique, il est impossible de réaliser ceci, puisque sa conduirait à prévoir dans les trames des champs de dimension infinie pour les numéros de séquence $N(S)$ et $N(R)$. Afin de résoudre ce problème, on est donc amené à numéroter les trames modulo un nombre M . On est donc amené à limiter le nombre de trames qui peuvent être expédiées en anticipation des acquittements. Ceci est réalisé en allouant à l'expéditeur un crédit d'émission W_e , qui est appelé **fenêtre d'émission** (*Window*), et dont la valeur indique le nombre maximum de trames d'information qui peuvent être en instance d'acquittement.

Comme il peut y avoir au maximum W_e trames en instance d'acquittement, l'expéditeur doit disposer d'une mémoire tampon capable de stocker W_e trames.

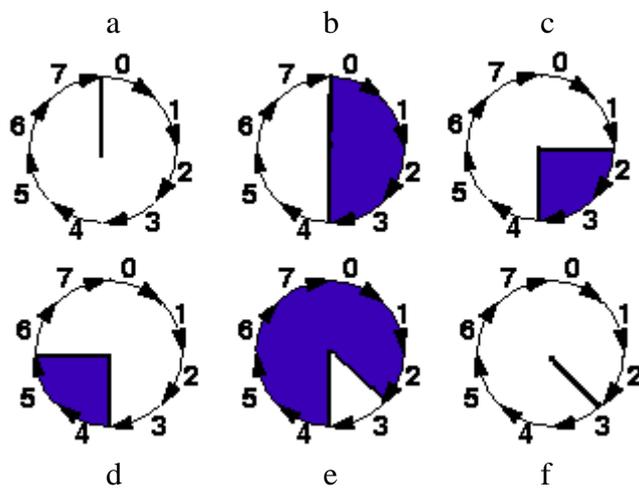
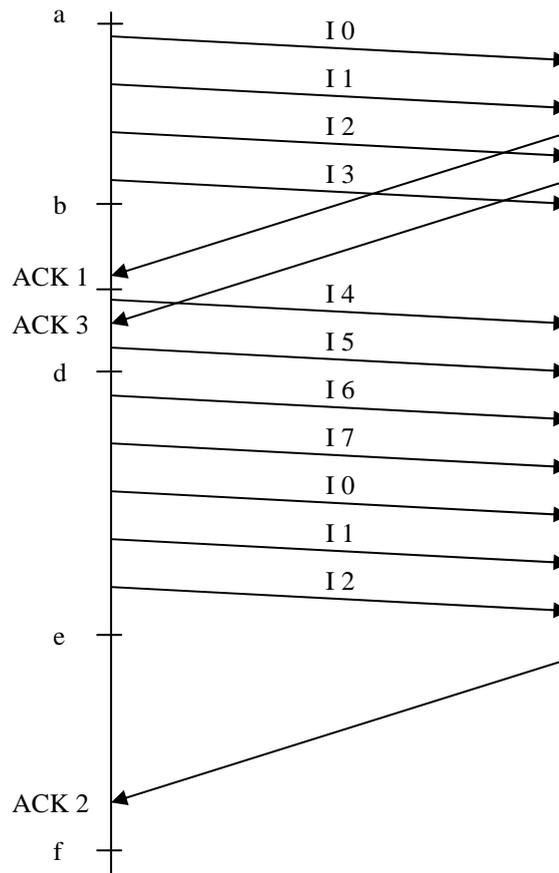


figure 42 : Exemple de procédure à fenêtre coulissante

Afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté possible sur la nature de l'acquittement, il faut que $We < M$. On voit ainsi qu'il ne peut y avoir plus de 7 trames en anticipation des acquittements ($we = 7$) lorsque la numérotation de séquence est effectuée modulo 8.

3.3 Procédure HDLC

La procédure HDLC (*High level Data Link Control procedures*) normalisée par l'ISO et l'UIT-T est définie pour des transmissions synchrones en semi-duplex ou duplex intégral sur des liaisons point à point ou multipoints.

Toutes les informations transmises sont considérées comme des groupements binaires (procédure orientée bit) et donc indépendantes d'un codage ou d'un alphabet particulier.

3.3.1 Structure des trames

Trois types de trames sont utilisées pour gérer la transmission ou échanger des informations :

- trame I d'information contenant essentiellement des données et des indications sur l'état de la transmission ;
- trame S de supervision permettant la gestion des erreurs et du flux ;
- trame U non numérotée (*unnumbered*) permettant notamment l'établissement et la libération de la liaison.

Chaque trame est constituée, suivant son type, d'un certain nombre de champs d'une taille multiple de 8 bits.

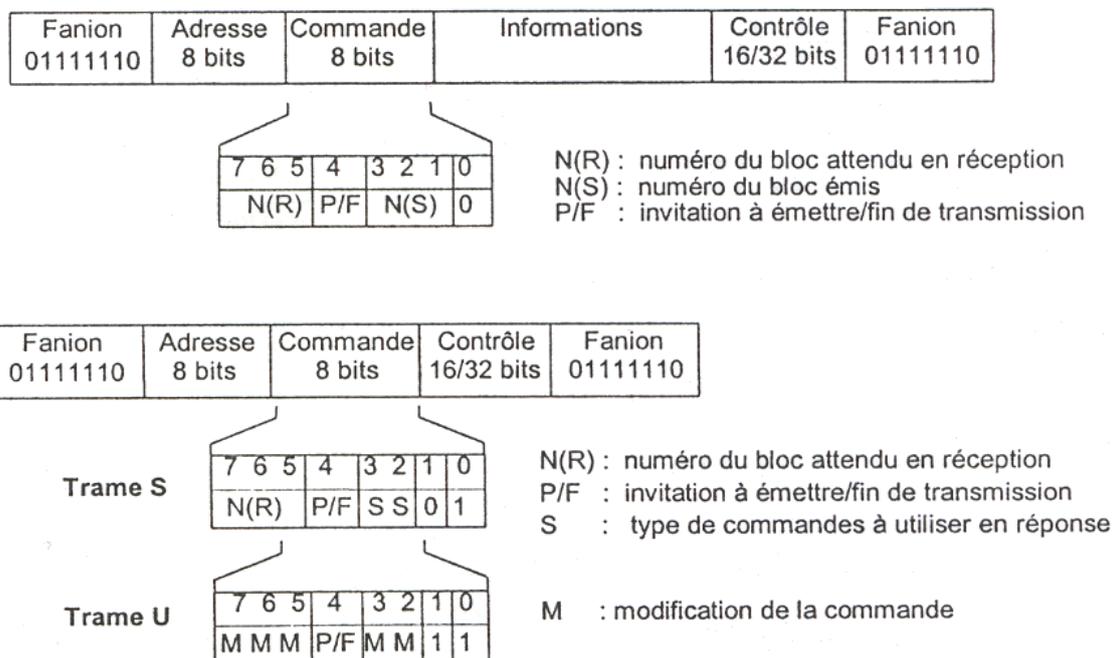


figure 43 : Trames HDLC

Tous les messages sont organisés en *trames* (figure 43) délimitées par deux *fanions* (*Flag*) définis par un 0 suivi de six 1 et d'un 0 (01111110). Cette configuration de bits est unique car la procédure interdit à tout autre endroit d'avoir plus de cinq 1 consécutifs.

Le **champ d'adresse** à 8 bits définit l'adresse de la station secondaire qui envoie la trame ou qui est destinataire de la trame. Le **champ d'information** est de dimension variable selon la longueur du texte à transmettre. A l'émission, le contrôleur HDLC insère un 0 après toute séquence de cinq 1 consécutifs (*Bit Stuffing*) du message utile, c'est-à-dire de la partie de la trame comprise entre les deux fanions. Le 0 éventuellement ajouté est éliminé à la réception. Ainsi, le message ne peut jamais produire une séquence susceptible d'être confondue avec un fanion, et le texte peut être transmis sans aucune limitation de code. Le dispositif d'insertion de 0 permet également de garantir un nombre suffisant de transitions du signal de ligne pour assurer la synchronisation bit au niveau des modems.

Le **champ de commande (8 bits, extensible à 16)** : la signification des 8 bits de l'octet de commande est fonction du type de trame (tableaux 1 et 2).

Dans les trames I et S, ce champ contient un numéro de séquence en réception $N(R)$ qui donne sur 3 bits le numéro de trame à recevoir. Un autre numéro de séquence en émission $N(S)$, géré indépendamment du précédent, est contenu dans le champ commande d'une trame I, il indique le numéro de trame émise.

Le bit P/F est appelé bit d'invitation à émettre ($P=Poll$) dans le cas d'une commande et bit de fin ($F=Final$) dans le cas d'une réponse et permet de demander l'acquittement immédiat d'une trame.

Les bits S permettent le codage de quatre types de trames de supervision ; les bits M permettent le codage de trente-deux types de trames non numérotées.

SS	Symbole	Description
00	<i>RR : Receiver Ready</i>	La station primaire indique qu'elle est prête à recevoir la trame n° N(R)
01	<i>RNR : Receiver Not Ready</i>	La station n'est pas prête à recevoir mais elle confirme la bonne réception des trames jusqu'au n° N(R) - 1
10	<i>REJ: REJect</i>	La station rejette les trames à partir du n° N(R) (erreur de transmission)
11	<i>SREJ: Selectif REJect</i>	Equivalent à REJ mais uniquement pour la trame n° N(R)

Tableau 1 : Champs de commande des trames S

M M M P/F M M 1 1	Symbole	Description
0 0 0 F 1 1 1 1	<i>DM : Disconnect Mode</i>	Indique à l'une des stations que la connexion est interrompue
0 0 0 P 1 1 1 1	<i>SARM : Set Asynchronous Response Mode</i>	Mettez-vous en mode asynchrone de réponse
1 0 0 P 0 0 1 1	<i>SNRM : Set Normal Response Mode</i>	Mettez-vous en mode de réponse normal
0 0 1 P 1 1 1 1	<i>SABM : Set Asynchronous Balanced Mode</i>	Etablissement de la liaison en mode équilibré (mode LAPB)
0 1 0 P 0 0 1 1	<i>DISC : Discorfinected</i>	Commande de déconnexion
0 1 1 F 0 0 1 1	<i>UA : Unumbered Acknowledgment</i>	Acquittement d'une commande non numérotée du type DISC, SABM...
1 0 1 F 0 1 1 1	<i>FRMR : Frame Reject</i>	Rejet définitif d'une trame
1 0 1 P/F 0 0 1 1	<i>XID : eXchange IDentification</i>	Echange d'identification des stations
1 0 0 F 0 1 1 1	<i>CMDR : Command Reject</i>	Rejet de commande
1 0 0 P 1 1 1 1	<i>RSET : Reset</i>	Remise à zéro

Tableau 2 : Champs de commande des principales trames U

3.3.2 Modes de fonctionnement de la procédure HDLC

La procédure HDLC peut fonctionner selon trois modes différents selon le type d'exploitation qui est désiré par l'utilisateur. Le mode normal de réponse *NRM* (*Normal Response Mode*) est utilisable pour des liaisons point à point ou multipoint qui met en oeuvre une station primaire et des stations secondaires. La station primaire est responsable de l'ouverture et de la supervision de la liaison, ainsi que de la reprise en cas de défaut. La liaison est ici déséquilibrée, et les stations secondaires n'ont pour rôle que de répondre aux commandes en provenance de la station primaire et d'émettre sur invitation. La station primaire initialise les opérations en mode normal de réponse par l'envoi de la commande *SNRM* aux différentes stations secondaires qui lui sont connectées. Le bit P de cette commande est positionné à 1, ce qui appelle un acquittement de la part de la station secondaire concernée, sous la forme de la réponse *UA* avec le bit F positionné à 1.

Le second mode de la procédure HDLC est le mode *ARM*. Ce mode est utilisable pour des liaisons point à point ou multipoint et met en oeuvre une station primaire et des stations secondaires similaires au mode normal de réponse. La station primaire reste ici responsable de l'initialisation de la liaison et la reprise. Toutefois, les stations secondaires peuvent émettre librement, sans attendre d'invitation à émettre, ce qui peut provoquer des collisions lorsque la liaison est exploitée à l'alternat. Pour cette raison, le mode asynchrone de réponse est employé essentiellement pour des liaisons point à point.

Dans le cas d'une liaison multipoint, une seule station secondaire peut être active à la fois. Le mode asynchrone de réponse est initialisé par la commande **SARM** à laquelle la station secondaire répond par **UA**.

Le mode **ABM** met en oeuvre deux stations identiques en mode équilibré. Chaque station dispose des capacités d'initialisation, de supervision et de reprise. Elle peut donc aussi bien envoyer que recevoir des commandes et des réponses. Le mode **ABM** est mis en oeuvre par la commande **SABM**, à laquelle la station destinataire répond par **UA**.

En fin de transaction, la station primaire peut obliger les stations secondaires à se déconnecter logiquement en leur envoyant la commande **DISC**, à laquelle elles répondent par **UA** avant de se déconnecter.

3.3.3 Description des échanges

La figure 44 décrit les phases d'un échange HDLC bidirectionnel entre deux stations. Pour chaque trame, est indiqué le type (SABM, UA, RR ou I pour une trame d'information) et la valeur des variables significatives (N(S), N(R) et P/F).

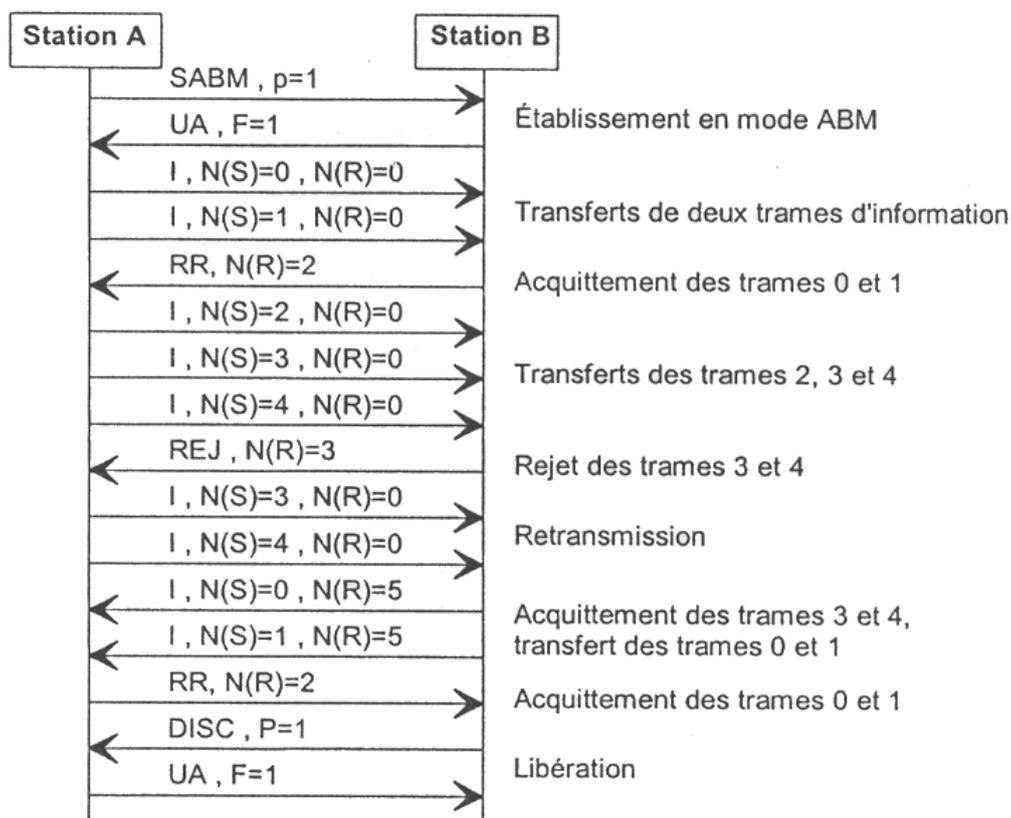


figure 44 : Exemple d'échange HDLC

- **Etablissement** de la liaison par émission des trames non numérotées SABM et UA. Le bit P/F est positionné à 1 dans la trame de commande SABM invitant la station B à répondre, celle-ci émet tout de suite un acquittement UA avec le bit F à 1.
- **Transmission** bidirectionnelle de trames d'information I avec gestion des numéros de séquence N(R) et N(S). L'acquittement des trames I émises jusqu'au numéro N(S)=x est réalisé par renvoi dans une trame RR ou I de N(R)=x+1, x+1 est le numéro de la trame attendue (exemple : N(R) = 4 acquitte les trames N(S) < 4). La trame REJ avec N(R) = x signifie le rejet des trames N(S) ≥ x. La gestion des numéros N(S) et N(R) est symétrique pour les deux stations (en mode LAPB) ; le transfert des trames I peut donc être réalisé en duplex intégral.
- **Libération** de la liaison par émission des trames non numérotées DISC et UA.

La figure 45 décrit un échange lorsque l'une des deux stations n'émet pas de réponse suite à une commande (perte d'une trame I) ; dans ce cas, plusieurs compteurs et temporisateurs permettent le contrôle de l'échange.

- Taille maximale de la trame N1 : nombre maximum de bits d'une trame, fanions exclus (N1=2104 pour le réseau Transpac).
- Délai maximal T2 : le récepteur d'une trame doit fournir une réponse avant dépassement du délai T2.
- Temporisateur T1 : à l'émission d'une trame, un temporisateur est armé avec une valeur T1 ; si l'acquittement n'intervient pas avant l'expiration de T1, une retransmission est effectuée. T1 dépend de la durée d'émission d'une trame de longueur maximale, de la valeur de T2, du temps de traitement d'une trame reçue et du temps nécessaire pour désamorcer le temporisateur (T1=100 ms pour un débit de 48000 bit/s sur Transpac).
- Nombre maximum de retransmissions N2 : une station, suite à une absence de réponse, peut effectuer sur expiration du temporisateur T1 un nombre maximum N2 de retransmissions (N2 = 10 sur Transpac), au-delà une procédure de défaillance est mise en oeuvre.

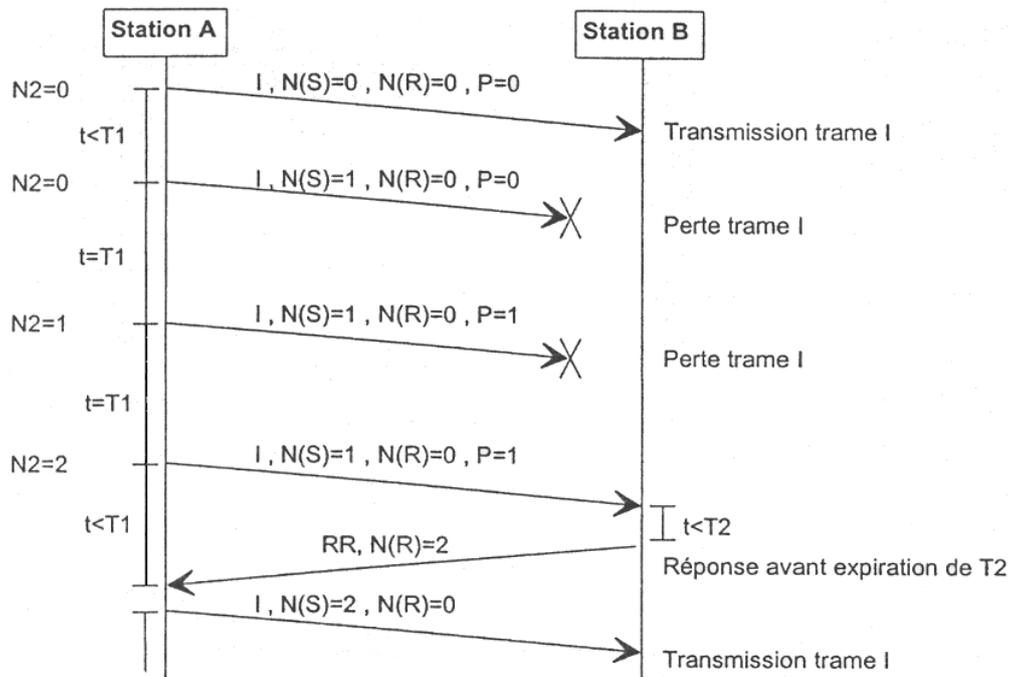


figure 45 : Echange HDLC avec absence de réponse

La figure 46 décrit un échange lorsque les tampons de la station réceptrice sont temporairement saturés et représente l'évolution des variables d'état internes.

- Variable d'état en émission $V(S)$: variable interne qui indique le numéro de séquence de la prochaine trame I à émettre. $V(S)$ peut prendre les valeurs 0 à 7 et est incrémentée de 1 à chaque émission d'une trame I. $V(S)$ ne peut dépasser le numéro $N(R)$ reçu d'une valeur supérieure au nombre de trames en anticipation K ($V(S) \leq N(R) + K$).
- Paramètre d'anticipation K : ce paramètre dont la valeur est fixée par les utilisateurs ; ($K \leq 7$) indique le nombre de trames pouvant être émises sans acquittement.
- Variable d'état en réception $V(R)$: variable interne qui indique le numéro de séquence de la prochaine trame I attendue en réception. $V(R)$ peut prendre les valeurs 0 à 7 et est incrémentée de 1 à chaque réception sans erreur d'une trame I.

Après établissement et initialisation des variables, la station A envoie trois trames. La variable $V(S)$ est incrémentée de 0 à 3 et devient égale à $N(R) + K$ (avec $N(R) = 0$ et $K = 3$) ; la station A ne peut alors plus anticiper et doit attendre un acquittement de la station B. La trame RR avec $N(R) = 2$ permet ensuite une anticipation jusqu'à $V(S) = 5$. La station B acquitte les trames 3 et 4 et indique une saturation de ses tampons par une trame RNR. La station A est contrainte à une attente de reprise durant laquelle elle interroge la station B par des trames RR. Lorsque celle-ci est à nouveau disponible, elle envoie une trame RR et le transfert peut se poursuivre.

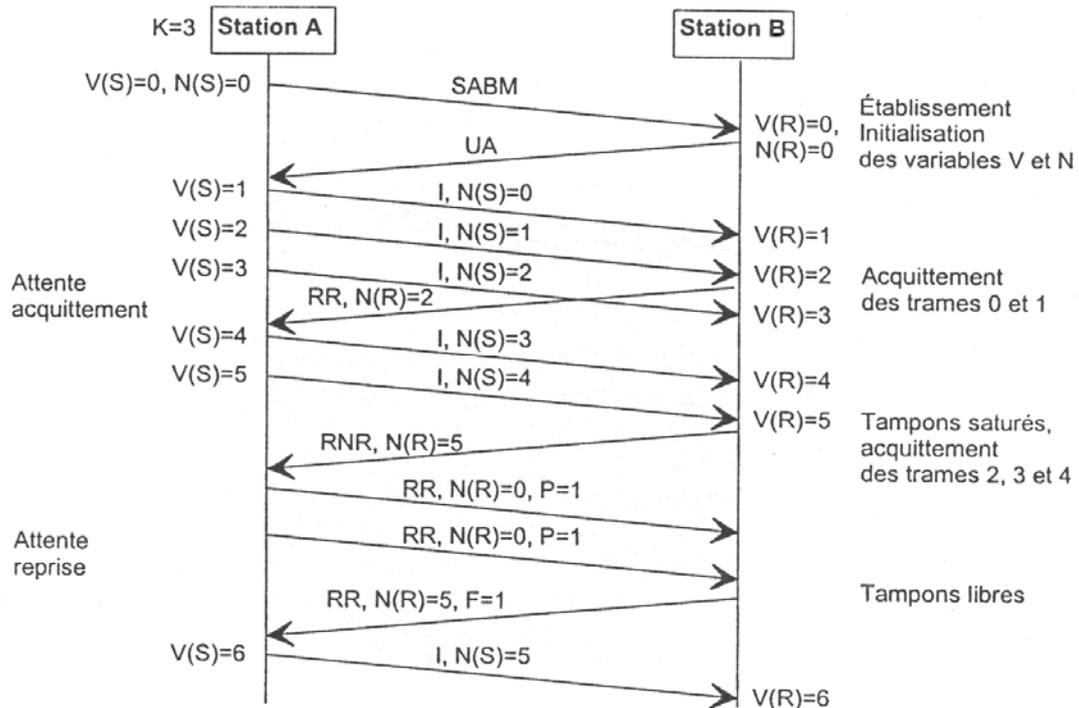


figure 46 : Echange avec saturation du récepteur

Les séquences d'établissement, de transmission, de reprise et de libération sont complètement décrites par des diagrammes d'état de la procédure HDLC.

Bibliographie

- Transmission et réseaux

Stéphane Lohier, Dominique Présent, DUNOD 1^{ère} et 2^{ème} éditions
(Ouvrage de 238 pages)

- Les Réseaux

Guy Pujolle, EYROLLES 1995
(Ouvrage de 835 pages)

- Réseaux et Télématique (Tome 1)

Guy Pujolle, Danielle Dromard, Dominique Seret, Eric Horlait, EYROLLES 1985
(Ouvrage de 311 pages)

- Le site web www.guil.net