



# Cours Réseaux

## PARTIE I

### Modèles de Réseaux & Couches Basses

Pascal Urien  
2011

## Sommaire

1. Le modèle OSI .....	6
1.1 Introduction.....	6
1.2 Le Modèle OSI.....	8
1.2.1 Notion de couche (Layer).....	8
1.2.2 Service et Protocole.....	9
1.2.3 Les Primitives de Services .....	10
1.3 Les 7 couches du modèle OSI. ....	10
1.3.1 La couche physique (1) - Physical Layer - PL.....	10
1.3.2 La couche Liaison de données (2)- Data Link Layer - DL .....	11
1.3.3 La couche Réseau (3) - Network .....	11
1.3.4 La couche Transport (4) - Transport .....	11
1.3.5 La couche session. (5) - Session .....	11
1.3.6 La couche présentation (6) - Presentation .....	11
1.3.7 La couche application (7) - Application .....	11
1.4 Le standard X.25 .....	11
1.5 Le Modèle IEEE.....	12
1.6 ANSI .....	13
2. Les réseaux TCP-IP .....	14
2.1 Introduction.....	14
2.2 Notion de réseaux et sous réseaux. ....	14
2.3 Identification d'un (sous) réseau.....	15
2.4 Communication entre (sous) réseaux.....	17
2.5 IP et l'OSI. ....	17
2.6 ARP et RARP .....	18
2.7 ICMP .....	18
2.8 Protocoles de routage .....	18
2.9 Protocoles de transport. ....	18
2.9.1 UDP User Data Protocol. ....	18
2.9.2 TCP Transmission Control Protocol.....	19
2.10 Applications.....	19
2.10.1 FTP File Transfer Protocol port 21.....	19
2.10.2 TELNET, TELcommunication NETwork port 23.....	19
2.10.3 SMTP Simple Mail Transfer Protocol port 25.....	19
2.10.4 NNTP Network News Transfer Protocol port 119 .....	19
2.10.5 HTTP Hyper Text Transfer Protocol port 80 .....	19
2.10.6 SNMP Simple Network Management Protocol port .....	19
2.11 Le paradigme des sockets. ....	19
2.11.1 bind() .....	20
2.11.2 listen().....	20
2.11.3 accept().....	20
2.11.4 connect().....	20
2.11.5 closesocket(desc_socket).....	21
2.11.6 send(),write() .....	21
2.11.7 sendto() .....	21
2.11.8 recv(),read().....	21
2.11.9 recvfrom() .....	21

2.12	Exemple de Routage.....	21
3.	Le Réseau Téléphonique Commuté RTC.....	23
3.1	Architecture générale. ....	23
3.2	Interface URA abonné. ....	24
3.3	Le combiné téléphonique classique, signalisation d'abonné. ....	25
3.4	Notion de commutation spatio-temporelle. ....	26
3.5	Signalisation et liaisons entre autocommutateurs.....	26
3.5.1	SONET .....	27
3.5.2	SDH .....	27
3.6	RNIS.....	27
3.6.1	Le modèle RNIS.....	28
3.7	Les PABX (autocommutateurs privés).....	30
3.7.1	Architecture type d'un PABX.....	30
3.7.2	Réseaux de PABX. ....	31
3.8	Le CTI, Computer-Telephone Integration. ....	31
3.8.1	SMDR .....	32
3.8.2	VMS .....	32
3.8.3	ACD .....	32
3.8.4	IVR.....	33
3.8.5	Audiotext.....	33
4.	Le réseau GSM .....	34
4.1	Historique .....	34
4.2	Le concept de réseau cellulaire. ....	35
4.3	La norme GSM .....	36
4.3.1	Les services supports. ....	36
4.3.2	Les télé-services .....	37
4.3.3	Services Supplémentaires .....	37
4.3.4	Techniques de multiplexage .....	37
4.4	Infrastructure .....	38
4.4.1	BTS.....	38
4.4.2	BSC .....	38
4.4.3	MSC.....	38
4.4.4	HLR.....	38
4.4.5	AUC .....	38
4.4.6	VLR.....	39
4.4.7	Network Subsystem NSS.....	39
4.4.8	OMC .....	39
4.4.9	Transmission radio.....	39
4.5	Pile protocolaire et sous système radio .....	40
4.5.1	Protocoles pour la signalisation .....	40
4.5.2	Sous système radio .....	40
4.6	Le sous système réseau.....	40
4.7	Les Terminaux.....	41
4.7.1	Quelques caractéristiques.....	41
4.7.2	Le module SIM.....	41
5.	Constellation de satellites .....	42
5.1	Quelques rappels de mécanique stellaire.....	42
5.2	Les satellites géostationnaires (GEO - Geosynchronous Earth Orbit).....	42
5.3	Les constellations téléphoniques.....	43
5.4	Constellations pour services large bande (projets abandonnés). ....	43

6.	La Couche 1 .....	44
6.1	Introduction.....	44
6.2	Canal de transmission.....	44
6.2.1	Théorème de Nyquist.....	45
6.2.2	Critère de Nyquist élargi .....	46
6.3	Auto-corrélation et densité spectrale de puissance.....	46
6.4	Notion de bruit gaussien blanc.....	47
6.5	Capacité d'un canal.....	47
6.6	Taux d'erreur binaire .....	47
6.7	Cable Coaxial - guide d'ondes.....	48
6.7.1	Le câble d'Ethernet.....	50
6.8	Fibre optique.....	51
6.8.1	Fibre à saut d'indice.....	51
6.8.2	Injection.....	52
6.8.3	Notion de dispersion.....	52
6.8.4	Fibre multimode.et monomode.....	53
6.8.5	Caractéristique de la fibre FDDI.....	53
6.9	Transmission en bande de base.....	53
6.9.1	Codage NRZ - Non Return To Zero .....	53
6.9.2	Code RZ unipolaire (Return To Zero) .....	54
6.9.3	Code bi-phase (ou Manchester).....	54
6.9.4	Code bi polaire (AMI alternate mark inversion NRZ ).....	54
6.9.5	Code NRZI.....	54
6.10	Multiplexage fréquentiel .....	55
6.11	Multiplexage temporel .....	56
6.12	Commutation de circuits et de paquets.....	56
6.13	Modulation.....	56
6.13.1	Modulation d'amplitude.....	56
6.13.2	Modulation de fréquence .....	56
6.13.3	Modulation de phase .....	56
6.14	Les modems.....	57
6.15	La Jonction V.24 et le standard RS232C.....	57
6.15.1	Exemple de mode asynchrone, la liaison série RS232-C .....	58
6.15.2	Exemple de mode synchrone, le BISYNC.....	58
6.16	Détection correction des erreurs.....	59
6.16.1	Bit de parité.....	59
6.16.2	Codes auto correcteurs .....	59
7.	La couche liaison de données.....	60
7.1	Introduction.....	60
7.2	Gestion de transmission de données.....	60
7.2.1	Protocole sans acquittement.....	60
7.2.2	Protocole «Stop and Wait» .....	61
7.2.3	Protocole avec fenêtre d'anticipation (ou encore fenêtre glissante).....	62
7.3	Couche liaison de données X25 - X25 niveau 2.....	64
7.3.1	Les trames I d'information.....	64
7.3.2	Les trames S de supervision.....	64
7.3.3	Les Trames U non numérotées.....	64
7.3.4	La procédure LAPB.....	65
7.4	La couche liaison de données LLC - ANSI/IEEE 802.2, ISO 8802/2.....	65
7.4.1	LLC type1.....	65

7.4.2	LLC type 2.....	65
7.4.3	LLC type 3.....	65
7.4.4	Interface LLC/Couche Réseau.....	65
7.4.5	Service sans connexion.....	65
7.4.6	Service avec connexion.....	65
7.4.7	Interface LLC/MAC.....	66
7.4.8	Structure des PDU LLC.....	66
7.4.9	Exemple de PDU.....	68
7.5	Illustration du fonctionnement de X25 niveau 2.....	69
8.	La sous couche MAC.....	70
8.1	Introduction.....	70
8.2	Classification des méthodes d'accès.....	70
8.3	Une méthode d'accès aléatoire le CSMA.....	70
8.3.1	CSMA persistant et non persistant.....	72
8.3.2	Le protocole 802.3 CSMA/CD.....	73
8.4	Une méthode d'accès déterministe, les anneaux à jeton.....	74
8.5	Notion de trame MAC.....	75
8.5.1	Structure d'une adresse IEEE.....	75
8.5.2	Détection des erreurs - CRC - Cyclical Redundancy Check.....	75
8.5.3	Exemples de trames.....	77
9.	La couche Réseau OSI (3).....	84
9.1	Introduction.....	84
9.2	La couche 3 OSI.....	84
9.2.1	Service avec et sans connexion.....	84
9.2.2	L'adressage au niveau réseau.....	84
9.3	La couche 3 IP.....	85
9.3.1	Adressage IP.....	85
9.4	Le routage (au sens OSI).....	86
9.4.1	Algorithme du plus court chemin.....	87
9.4.2	Routage multi chemin.....	87
9.4.3	Routage Centralisé.....	87
9.4.4	Routage Local.....	87
9.4.5	L'inondation.....	88
9.4.6	Le routage distribué.....	88
9.4.7	Routage optimal.....	88
9.4.8	Routage par optimisation du flux.....	88
9.5	Contrôle de congestion.....	88
9.5.1	Pré allocation de tampons (buffer).....	88
9.5.2	La destruction de paquets.....	88
9.5.3	Les paquets d'engorgement.....	89
9.6	Interconnexion de réseaux (au sens OSI).....	89
9.6.1	Les répéteurs.....	89
9.6.2	Les ponts.....	90
9.6.3	Les passerelles.....	90
9.7	Exemple de couche réseau.....	91
9.7.1	X25.....	91
9.8	Equivalence des services OSI et X25.....	96
9.8.1	IP.....	96
9.9	Exemple d'un dialogue X25.....	98
9.10	Arbre réducteur.....	100

«Mr. Watson, come here, I want you» A.G Bell 1876

## 1. Le modèle OSI

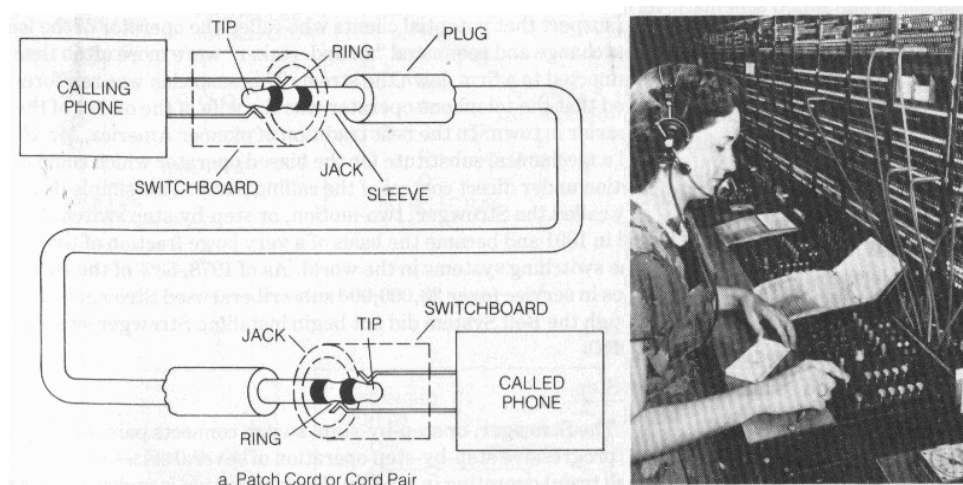
### 1.1 Introduction.

La communication est un besoin vital de l'espèce humaine depuis son apparition, et s'effectue à l'aide de tout ou partie de ses sens, d'abord par l'image, ensuite par le son, et enfin par l'écrit. Les télécommunications permettent de mettre en relation des individus qui sont géographiquement éloignés, leur développement et leur amélioration ont fait l'objet d'une recherche constante produisant des solutions de plus en plus rapides, travaillant à l'échelle planétaire voire spatiale.

Des systèmes anciens, tels que le sémaphore des frères Chappe (1792), ou le morse (1838) sont capables d'assurer des communications sur de larges étendues, en introduisant la notion de relais. Si l'on choisit la distance entre deux opérateurs de manière à ce que l'erreur puisse être considérée comme nulle ou très faible, l'information sera transmise de proche en proche vers son destinataire.

L'ère des communications moderne débute le 10 mars 1876, avec l'invention du téléphone par Alexander Graham Bell. Il existe une polémique sur la paternité de A.G Bell, le 11 juin 2002 par la Chambre des représentants des États-Unis a reconnu le rôle d'Antonio Meucci: *"Expressing the sense of the House of Representatives to honor the life and achievements of 19th Century Italian-American inventor Antonio Meucci"*.

Chaque abonné est relié au central à l'aide de deux fils nommés **Tip et Ring**, par analogie avec la prise utilisé au central. Une fois le téléphone décroché le client entre en conversation avec l'opérateur du central et lui indique les coordonnées de son correspondant. Si ce dernier n'est pas local l'opérateur entre alors en relation avec l'un de ses collègues, et ainsi de suite. Le dernier opérateur contacté entre en relation avec le destinataire de l'appel, la communication est alors établie.



A travers cet exemple se dessinent les différents niveaux d'un système de communication.

**Le niveau physique** c'est à dire la technologie utilisée par ce système (câbles, poste téléphonique, courant électrique, transformateurs ...), mais également la méthode utilisée pour coder l'information (le son est une onde de pression, on le transforme en grandeur électrique par un transducteur - le microphone - puis on code cette grandeur par un mot de 8 bits qui fournit 256 valeurs différentes).

**Les règles d'accès au média.** Une des préoccupations majeures des constructeurs téléphoniques est de transporter le plus de conversations simultanées à travers un câble (c'est en travaillant sur ce problème que Shannon a énoncé son fameux théorème). Dès lors que des octets, images de différentes conversations transitent sur un câble électrique il devient nécessaire d'organiser ces trains d'information binaires de telle manière que l'on puisse identifier l'émetteur et le destinataire de chaque message (le message étant une mesure de la voix, effectuée toutes les 0.125 millisecondes et codée par 8 bits).

**Le routage,** c'est à dire l'acheminement de l'information depuis sa source jusqu'au destinataire final. Dans notre exemple on voit une phase d'établissement de la communication, de proche en proche les opérateurs définissent la route à suivre, qui reste valide durant toute la conversation. Cette contrainte induite par la nature même d'un dialogue humain, disparaît avec d'autres types d'échanges (tels que le transfert de fichiers), dans ce cas l'information peut emprunter des chemins différents, établis de proche en proche.

**Le transport,** il est possible de perdre des octets d'informations parce que les routes empruntées sont de mauvaises qualités ou surchargées. Cette perte est tolérable pour certain services (voix notamment), mais tout à fait inacceptables lors du transfert de fichiers, dans ce cas il est nécessaire d'introduire des mécanismes pour détecter et demander la retransmission des pièces d'informations perdues ou erronées. Le transport délivre une information exempte d'erreur (du moins théoriquement !), on peut considérer que tous les problèmes liés au transfert de l'information ont été réglés à ce niveau.

**La session,** deux locuteurs parlent naturellement à tour de rôle (si tel n'est pas le cas la conversation devient difficile à suivre !). D'une certaine manière ils échangent un droit à la parole en menant la conversation sous forme de questions-réponses. La session gère le transfert des données et le déroulement des activités induites.

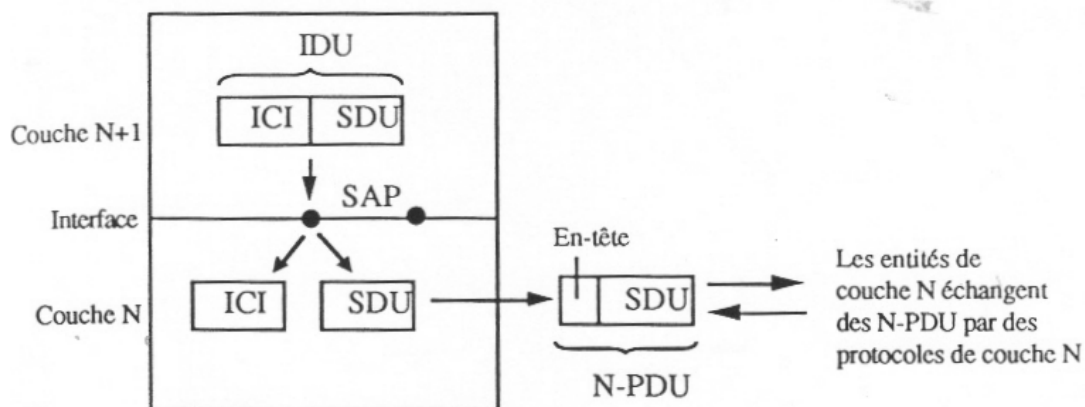
**La présentation,** c'est à dire la définition du langage utilisé (codage de l'information), et l'introduction de codes secrets (cryptage) si un certain niveau de sécurité est nécessaire.

Enfin l'**application** qui a pour but d'offrir un service à l'utilisateur (le 17 pour les pompiers...) tel que terminal virtuel ou courrier électronique.

## 1.2 Le Modèle OSI

Ce modèle issu des travaux de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO "International Organization for Standardization" (Day et Zimmermann<sup>1</sup> en 1983), est appelé *Modèle de Référence OSI (Open Systems Interconnection)* et propose une architecture de réseau pour les systèmes dits «ouverts», c'est à dire respectant certaines méthodes de communication. Le modèle de référence OSI comporte 7 couches.

### 1.2.1 Notion de couche (Layer)



IDU : Unité de données d'interface entre couches ( *Interface Data Unit* )

ICI : Information de commande de l'interface ( *Interface Control Information* )

SDU : Unité de données de service ( *Service Data Unit* )

SAP : Point d'accès d'un service ( *Service Acces Point* )

N-PDU : Unité de données de protocole de couche N ( *N- Protocol Data Unit* )

Le traitement des communications est effectué à travers différents sous-systèmes, L'ensemble des sous-systèmes de mêmes rangs N, constitue la couche (N) du modèle OSI.

Chaque couche exerce une fonction spécifique (pas de redondance).

Les éléments actifs d'un sous-système sont appelés **entités**, une entité peut être logicielle (programme...) ou matérielle (puce de silicium),

Les entités réalisent un «**Service**» (implémenté par software ou hardware). Une couche N est fournisseur de service pour le couche N+1 et utilisateur de service de la couche N-1.

L'accès aux services s'effectue en des points nommés **SAP** (Service Access Point), chaque SAP est identifié par une adresse unique. Par exemple le SAP est une prise et l'adresse du SAP un numéro de prise.

Deux couches communiquent à travers une interface. L'interface est matérialisée par des **IDU** (Interface Data Unit). Un **IDU** comprend des éléments de contrôles **ICI** (Interface Control Information) et des données de service **SDU** (Service Data Unit). Par exemple un IDU comportera un ensemble de données telles que longueur des

<sup>1</sup>Hubert Zimmerman, "OSI Reference Model - The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection," IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-28, No. 4, April 1980, pp. 424-432



SDU, et paramètres décrivant le type de service utilisé. La description d'une interface se présente généralement sous la forme d'une spécification d'un ensemble de commandes (exprimées parfois en langage C).

Pour transmettre un SDU une couche peut devoir le découper en plusieurs morceaux. Chaque tronçon reçoit un en-tête, on obtient alors un **PDU** qui comporte donc un en-tête et une portion de SDU.

Une couche N reçoit des SDU et produit des PDU.

Exemple de cheminement logique pour la production de PDU MAC.

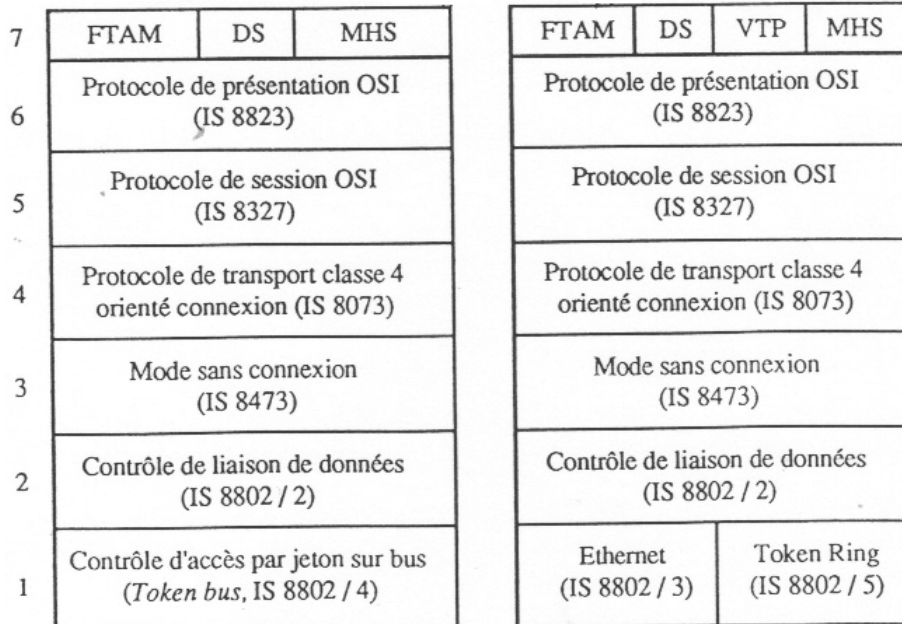
UserData

Application	A_PDU	[Aheader	Udata]	
Presentation	P_PDU	[Pheader	APDU]	
Session	S_PDU	[Sheader	PPDU]	
Transport	T_PDU	[Theader	SPDU]	
Network	N_PDU	[Nheader	TPDU]	
LLC	L_PDU	[Lheader	NPDU]	
MAC	MA_PDU	[MAHeader	LPDU	MATrailer]

MACDU

[MAHeader-LHeader-NHeader-Theader-SHeader-PHeader-AHeader-UData--MATrailer]

La couche N d'un système gère les échanges avec une couche externe homologue. L'ensemble des règles utilisées est appelé **protocole** de la couche N, les entités analogue entre différentes machines sont nommées **processus pair**.



Groupes de protocoles TOP et MAP

### 1.2.2 Service et Protocole.

L'OSI distingue les notions de service et de protocole. Un service est un ensemble de primitives fournit par une couche à son voisin supérieur. Le service décrit les opérations que la couche peut réaliser pour le compte de son utilisateur. Par contre

le service ne comporte aucune indication sur la manière dont ces opérations sont réalisées.

En revanche le protocole décrit l'organisation et les règles (format des messages, des paquets ...) utilisés par des entités paires pour réaliser un service.

### 1.2.3 Les Primitives de Services

Un service est formellement décrit par un ensemble de primitives. Une primitive est en fait une commande échangée entre deux couches adjacentes. Il existe quatre types de primitives de services.

.Request	Demande de service.
.Confirm	Réponse à une demande de service.
.Indication	Notification d'un évènement.
.Response	Réponse à un évènement.

On peut distinguer deux grandes classes de service, les **services en mode connexion** pour lesquels un chemin est établi entre deux entités, puis utilisé et enfin abandonné, et les **services sans connexion** ou les entités communiquent sans utiliser de chemin préalablement défini.

Un service sans connexion et sans acquittement, c'est à dire sans notification de réception par le destinataire est dit **service datagramme**.

Exemple : les primitives suivantes s'appliquent à un service connecté

(DIS)CONNECT.request, je veux me (de)connecter.

(DIS)CONNECT.indication, un correspondant désire se (de)connecter

(DIS)CONNECT.response, j'accepte/je rejete la demande de (de)connexion.

(DIS)CONNECT.confirm, la demande de (de)connexion a été

acceptée/refusée.

DATA.request, j'é mets des données.

DATA.confirm, la demande d'émission a été traitée.

DATA.indication, de données ont été reçues.

## 1.3 Les 7 couches du modèle OSI.

### 1.3.1 La couche physique (1) - Physical Layer - PL

*« La couche physique fournit les moyens mécaniques, électriques, fonctionnels et procéduraux nécessaires à l'activation, au maintien et à la désactivation des connexions physiques destinées à la transmission de bits entre deux entités de liaison de données. Une connexion physique peut mettre en jeu plusieurs systèmes intermédiaires, relayant chacun la transmission des bits dans la couche physique. »*

Elle se décompose en deux sous niveaux :

le **PMD** (Physical Medium Dependant, description du média utilisé, câbles, prises...

le **PHY** (Physical), qui décrit la correspondance entre le signal reçu et son interprétation sous forme binaire (codage). On obtient en sortie de cette couche un flux de données binaire.

### 1.3.2 La couche Liaison de données (2)- Data Link Layer - DL

Elle se décompose en deux sous niveaux

- le **MAC** (Medium Access Control), qui organise les trains binaires sous forme de trame ou encore paquet.

- le niveau **LLC** (Layer Link Control) qui fournit des services avec ou sans connexion, qui peut assurer des fonctions de contrôle de flux (régulation des transferts de trame pour «éviter une saturation du récepteur) et de correction d'erreur (par retransmission des trames non reçues ou erronées).

### 1.3.3 La couche Réseau (3) - Network

La couche réseau assure le routage de données (les T\_SDU) jusqu'à leur destinataire, et adapte ses P\_SDU à la taille maximale des paquets supportée par le niveau MAC (**segmentation**). Un **relais** est un système qui ne comporte que les trois premières couches du modèle OSI, et qui est essentiel quant au bon acheminement d'un paquet vers son destinataire.

### 1.3.4 La couche Transport (4) - Transport

*« Le service de transport assure un transfert de données transparent entre entités de session en les déchargeant complètement des détails d'exécution d'un transfert de données fiable et d'un bon rapport qualité/prix. La couche transport optimise l'utilisation des services réseau disponibles afin d'assurer au moindre coût les performances requises par chacune des entités de session. »*

On trouvera dans cette couche les services suivants:

Contrôle de flux.

Contrôle/récupération d'erreurs.

Séquencement des messages (flux séquentiel d'octets vers la couche session).

Fragmentation des messages de la couche session.

### 1.3.5 La couche session. (5) - Session

*« Le rôle de la couche session est de fournir aux entités de présentation coopérantes les moyens nécessaires pour organiser et synchroniser leur dialogue et pour gérer leur échanges de données. A cet effet, la couche session fournit les services nécessaires à l'établissement d'une connexion de session entre deux entités de présentation et à la prise en charge des interactions ordonnées d'échanges de données. »*

### 1.3.6 La couche présentation (6) - Presentation

*«La couche présentation se charge de la représentation des informations que des entités d'application se communiquent, ou auxquelles elles se réfèrent au cours de leur dialogue»*

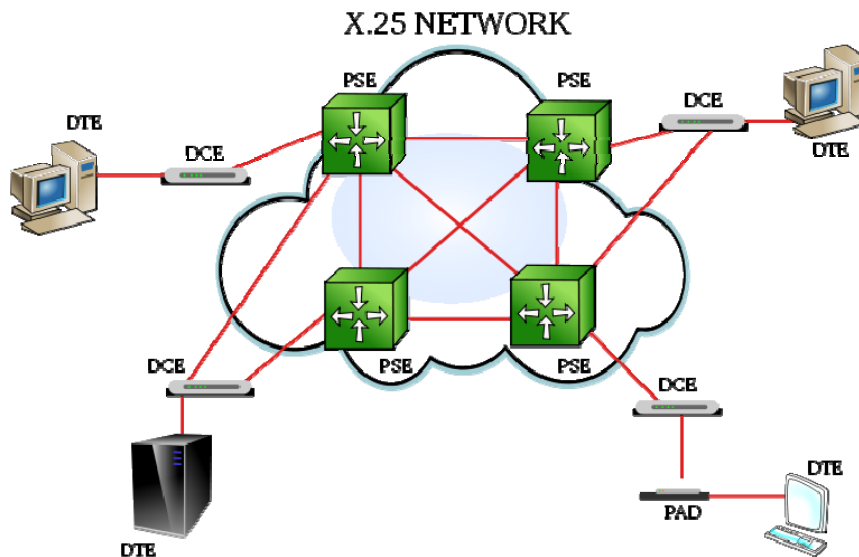
### 1.3.7 La couche application (7) - Application

La couche application fournit à l'utilisateur un service qui s'appuie sur l'ensemble des couches OSI.

## 1.4 Le standard X.25

Le modèle X.25 (un réseau à commutation de circuit, Genève 1976) est défini par le CCITT (Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique, responsable

entre autres de la normalisation de l'Asynchronous Transfer Mode), et constitue un bon exemple de réalisation des couches 1,2,3 définies par l'OSI.



La couche 1 est constituée de DCE (Data Communication Equipment ou ETCD, Equipement de Terminaison de Communication de données), matérialisée par des modems. Les couches 2 et 3 sont logées dans des DTE (Data Terminal Equipment, ou ETTD Equipement Terminal de Traitement de Données), réalisé par des systèmes informatiques.

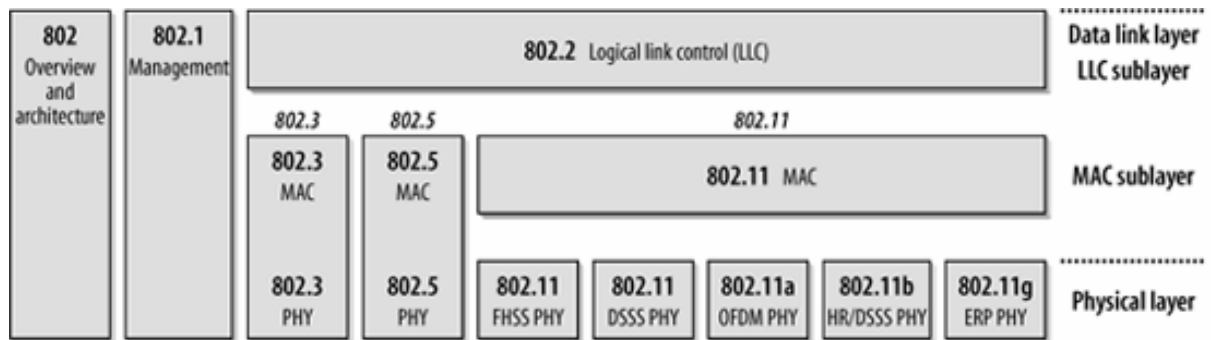
L'Interface électrique (brochage ...) entre DCE et DTE est décrite par la recommandation X.21. Pour mémoire on citera l'avis V.24 qui spécifie les signaux de jonction entre DCE et DTE, et qui largement utilisée.

La couche 2 décrit le niveau trame. Les trames X.25 sont encore connues sous le nom de trames HDLC (High Level Data Link Control). Cette couche assure la détection des erreurs, leur récupération par répétition, ainsi que le contrôle de flux. Trois type de *procédures* supervisent ces fonctions, LAP (Link Access Procedure), LAPB (Link Access Procedure Balanced), et MLP (MultiLink Procedure).

La couche 3 décrit le niveau paquet. Différentes procédures sont définies, procédure d'appel (*initiation call*), procédure de transfert de données (*Data Transfer*) et procédure de traitement d'erreur (*Error Handling*). En particulier l'adresse de destination du paquet est constituée par une suite de chiffres décimaux codés en BCD. (2 digits/octets).

### 1.5 Le Modèle IEEE

Naît en 1980, le projet IEEE 802 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) établit des standards pour l'interconnexion des équipements informatiques (correspondants aux niveaux 1 et 2 de l'OSI). Il a défini deux sous couches au niveau 2, à savoir MAC (Media Access Control) et LLC (Logical Link Control), par analogie MAC correspond au niveau trame HDLC de X.25 et LLC au niveau LAP.



La norme IEEE 802.1 spécifie entre autre des protocoles d'administration (802.1b) implémentés au niveau de la couche 2, et les méthodes de pontage au niveau MAC (802.1d - MAC Bridge), c'est à dire les méthodes utilisées pour relier des réseaux locaux dépourvus de couche 3.

Parmi les documents les plus significatifs de l'IEEE 802, on peut citer:

- 802.2 - Spécification de la sous couche LLC.
- 802.3 - (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), Ethernet.
- 802.5 - Token Ring, anneau à jeton introduit initialement par IBM.
- 802.11- Réseau Wi-Fi
- 802.15- Réseau Bluetooth et ZibBee
- 802.16 – Réseau Wimax

Le projet IEEE 802 a historiquement joué un rôle important au niveau des réseaux locaux (**LAN** - Local Area Network, type de réseau dont l'étendue géographique est restreinte par opposition au **WAN** - World Area Network de portée mondiale - réseau téléphonique par exemple).

### 1.6 ANSI

L'American National Standard Institute joue un rôle important dans le développement de réseau à hauts débits optiques tels que FDDI (Fiber Distributed Data Interface - ANSI X3T9) ou Fibre Channel.

«IP Over Everything»

## 2. Les réseaux TCP-IP

### 2.1 Introduction

Au début des années 70 le département américain de la défense (**DoD**, Department Of Defense) s'intéressa au développement d'un réseau capable de fonctionner après une destruction partielle de ses éléments. L'**ARPA** (Advanced Research Projects Agency) commença à travailler à la technologie **Internet** vers le milieu des années 70, l'architecture et les protocoles prirent leur forme définitive entre 77 et 79 (Internet Protocol IP, septembre 81), la technologie IP fut introduite en premier lieu sur le réseau à commutation de paquet **ARPANET**.

En 1979, l'ARPA crée le comité ICCB (Internet Control and Configuration Board) pour coordonner toutes les recherches entreprises dans ce domaine.

En janvier 1983, ARPANET est divisé en une branche civile et une branche militaire.

Le système d'exploitation **Unix**, né au début des années 70 se développe sur des stations de travail utilisant la technologie des processeurs **RISC** (Reduce Instruction Set Processor apparus au début des années 80). Au cours de cette décennie le réseau local **Ehternet** (802.3) se répand largement (développé conjointement par Xerox Corporation, Intel Corporation et Digital Equipment Corporation).

La suite des protocoles TCP/IP est portée sur le système d'exploitation Berkeley Unix utilisé par de nombreuses universités américaines (encore connu sous le nom de **Unix BSD** - Berkeley Software Distribution). De surcroît l'Unix de Berkeley intègre un nouveau concept, les **sockets** qui permet aux applications d'accéder aux protocoles TCP/IP.

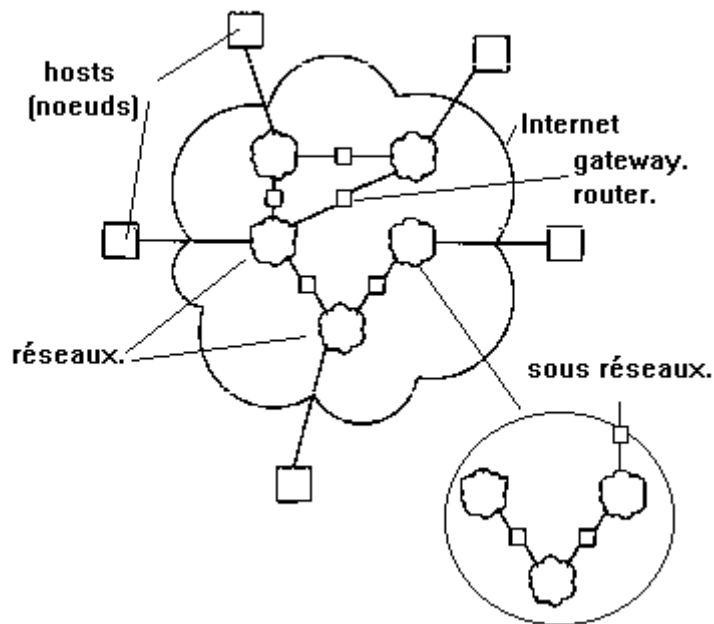
En 1983 le ICCB est réorganisé et devient l'Internet Architecture Board (**IAB**) destiné à coordonner la recherche et le développement dans l'internet. Cette organisation comporte deux groupes majeurs l'**IETF** (*Internet Engineering Task Force*) et l'**IRTF** (*Internet Research Task Force*). La première réunion de l'IETF eut lieu en 1986 avec 30 participants

Les protocoles mis en oeuvre sont décrits dans des documents nommés **RFC** (*Request For Comments*), qui sont gérés par l'**INTERNIC** (Internet Network Information Center).

### 2.2 Notion de réseaux et sous réseaux.

L'idée clé d'Internet consiste à interconnecter des réseaux. Un réseau est généralement divisé en plusieurs sous réseaux. Un sous réseau est en fait un réseau local LAN, c'est à dire un ensemble de noeuds informatiques reliés au même média physique, et respectant un protocole MAC identique, par exemple Ethernet. Un élément d'un sous réseau est identifié par une adresse MAC spécifique du type de réseau utilisé.

Un réseau d'entreprise est constitué par exemple de plusieurs sous réseaux (802.3, FDDI) incapables de communiquer physiquement entre eux (c'est une évidence si certains utilisent un câble coaxial et d'autres des fibres optiques).



### 2.3 Identification d'un (sous) réseau

On affecte à chaque noeud une adresse (IP) unique, qui se présente sous forme de quatre nombres (4x8 bits) compris entre 0 et 255 (par exemple 129.192.52.4).

Les adresses IP sont organisées de manière hiérarchique, et définissent des classes de réseau (respectivement A,B,C,...)

	0	1	2	3	4	8	16	24	31	
Class A	0	netid				hostid				
Class B	1	0	netid				hostid			
Class C	1	1	0	netid			hostid			
Class D	1	1	1	0	multicast address					
Class E	1	1	1	1	0	reserved for future use				

Classes d'Adresses IP

Si le nombre le plus à gauche de l'adresse est compris entre 1 et 126, il identifie un réseau dit de Classe A (il existe donc 126 réseaux de classe A). Les trois nombres de droite identifient une machine sur un tel réseau ( $256.256.256 = 16\ 774\ 214$  machines possibles !!!).

Si le nombre le plus à gauche de l'adresse est compris entre 128 et 191, les deux nombres les plus à gauche identifient un réseau de classe B (soit environ

64.256=16384 réseaux de classe B. Les deux nombres les plus à droite identifient une machine sur le réseau de classe B (environ 256.256 = 65 536 machines possibles).

Si le nombre le plus à gauche de l'adresse est compris entre 192 et 223, les trois nombres les plus à gauche identifient un réseau de classe C (il existe environ 32.256.256=2 097 152 réseaux de classe C, de 192.000.000 à 223.255.255, les adresses qui se terminent par 0 ou 255 sont réservées). Le nombre le plus à droite identifie une machine sur le réseau de classe C (254 machines possibles, numérotées de 1 à 254).

Ainsi 32.34.51.1 est une adresse de classe A, 129.55.67.1 est une adresse de classe B, et 192.67.33.1 une adresse de classe C.

Pratiquement les réseaux de classe A sont réservés à des organisations gouvernementales. Les réseaux de classes B fleurissent dans les entreprises importantes, les universités ou les centres de recherches. Enfin les réseaux classes C se rencontreront au sein de petites entreprises (moins de 254 machines connectées).

Les réseaux IP de classe A ou B, sont en fait constitués d'une communauté de réseaux locaux. Dans ce cas chaque réseau local (sous réseau) possède un nombre maximum de machines qui est une puissance de deux ( $2^n - 2$  en fait)

all 0s		This host <sup>1</sup>
all 0s	host	Host on this net <sup>1</sup>
all 1s		Limited broadcast (local net) <sup>2</sup>
net	all 1s	Directed broadcast for net <sup>2</sup>
127	anything (often 1)	Loopback <sup>3</sup>

Notes: <sup>1</sup> Allowed only at system startup and is never a valid destination address.

<sup>2</sup> Never a valid source address.

<sup>3</sup> Should never appear on a network.

#### Adresses IP réservées

Le masque de réseau ('**netmask**' en anglais) permet de déterminer le nombre maximum d'éléments sur un réseau local, il est constitué par 4 entiers compris entre 0 et 255. C'est un nombre de 32 bits dont la partie gauche ne comporte que des "1" et la partie droite uniquement des "0" (n bits). Le «ET» bit à bit de l'adresse de la passerelle et du *netmask* fournit l'identifiant (*NETID*) du sous réseau (32-n bits). L'identifiant d'une machine (*HOSTID*) est compris entre 1 et  $2^n - 2$ .

Par exemple un masque égal à 255.255.254.0, signifie que chaque réseau local comprend (256-255).(256-255).(256-254).(256-0) = 1.1.2.256 = 512-2 machines.



Un masque égal à 255.255.255.0, avec une adresse de passerelle de classe B, nous informe qu'il existe au maximum 254 machines par réseau local, l'adresse IP (n1.n2.n3.n4) s'interprète alors de la manière suivante :

n1.n2 identifie le réseau IP de classe B

n3 représente le numéro du sous réseau (en fait un réseau local).

n4 est une machine du sous réseau n3 du réseau classe B (n1.n2)

## **2.4 Communication entre (sous) réseaux**

Une machine informatique possède une adresse MAC sur son réseau local et une adresse IP. Le protocole IP n'est pas capable de se transporter seul, il doit être inséré dans des trames utilisées par le réseau local.

Grâce au masque de réseau un noeud déduit si le destinataire (identifié par son adresse IP) appartient ou pas à son propre réseau local. Si le correspondant recherché est local, l'information sera envoyée directement à l'adresse MAC de ce dernier. Dans le cas contraire le paquet IP est émis à destination de la passerelle du réseau local. La passerelle (**gateway** ou **router**) est l'élément clé du transport de l'information à travers Internet, elle est reliée à plusieurs réseaux locaux, et a pour fonction de transférer de l'information entre ces derniers.

Lorsqu'une passerelle reçoit un paquet IP elle procède de la manière suivante:

-si le destinataire du paquet appartient à l'un des réseaux locaux reliés à la passerelle, le paquet est expédié à l'adresse MAC du destinataire.

-dans le cas contraire le paquet est envoyé à l'adresse MAC d'une autre passerelle qui constitue un maillon du chemin menant au destinataire. On peut considérer que chaque passerelle connaît un chemin physique qui permet de se rapprocher du réseau où réside le correspondant.

Internet est donc constitué d'un ensemble diffus de passerelles qui relie des réseaux aussi hétérogènes que des tronçons Ethernet, des liaisons satellites, des câbles sous marins, ou des lignes téléphoniques. Un paquet IP traverse un certain nombre de passerelles avant d'atteindre son but, les itinéraires empruntés par deux paquets consécutifs ne sont pas forcément les mêmes car les passerelles peuvent posséder plusieurs routes vers une même destination, ce qui les obligent à choisir le meilleur chemin à un instant donné.

Certains sous réseaux ne comprennent que deux noeuds (c'est en fait une liaison point à point). La gestion du niveau 2 peut être assurée par des procédures X.25, ou bien encore les paquets IP peuvent être encapsulés dans des paquets X.25 («Tunnelling»).

## **2.5 IP et l'OSI.**

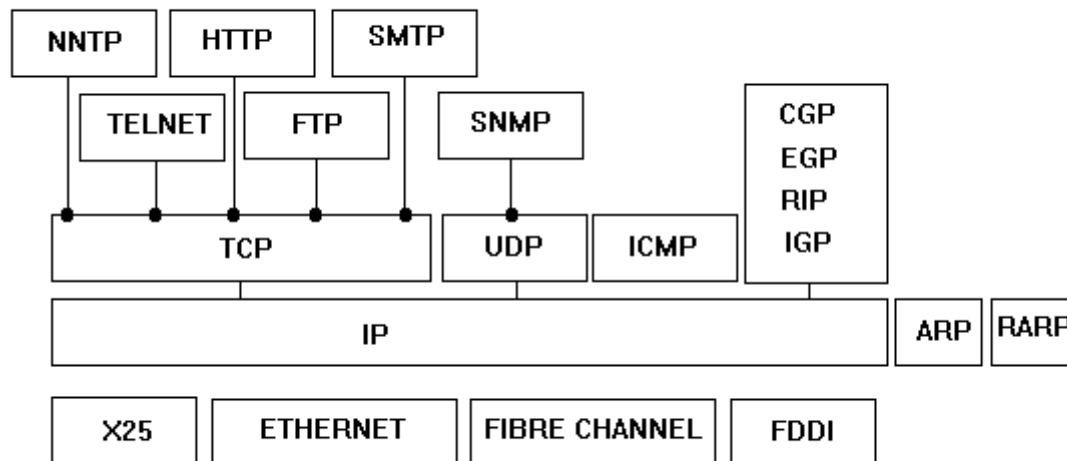
Le niveau physique du réseau local est décrit par le niveau 1 de l'OSI.

Le niveau MAC du réseau local est décrit par une sous couche du niveau 2 de l'OSI.

La couche LLC n'est pas indispensable au fonctionnement d'un réseau IP, elle est absente de la plupart des couches liaisons qui supportent IP.

Le protocole IP correspond à la couche 3 de l'OSI, il assure les services suivants:  
 routage des paquets.  
 segmentation, c'est à dire compatibilité entre la PDU IP et la PDU MAC  
 (respect d'une taille maximale en particulier).

Mais le protocole ne garantit pas le bon acheminement des paquets



## 2.6 ARP et RARP

ARP (Address Resolution Protocol) est un protocole implémenté « au dessus » de la couche MAC. La trame ARP est émise en « broadcast » ou diffusion (tous les noeuds du sous réseau le reçoivent), ARP a pour fonction d'obtenir l'association entre une adresse IP et une adresse MAC. RARP (Reverse ARP) réalise l'opération inverse.

## 2.7 ICMP

Internet Control Message Protocol, protocole d'information entre noeuds utilisateurs de service internet (Ping, algorithmes de traçage de route ...).

## 2.8 Protocoles de routage

GGP: *Gateway to Gateway Protocol*, mise à jour de table de routage dans ARPANET.

IGP: *Internal Gateway Protocol*, mise à jour de tables de routage au sein d'un système autonome (par exemple RIP).

EGP: *External Gateway Protocol*, mise à jour de tables de routage entre systèmes autonome.

## 2.9 Protocoles de transport.

Les protocoles de transports fournissent des services similaires à la couche 4 de l'OSI.

### 2.9.1 UDP User Data Protocol.

Mode non connecté. Pas de contrôle de flux ni récupération d'erreur.

## 2.9.2 TCP Transmission Control Protocol

Equivalent au protocole ISO classe 4 (TP4). Mode connecté, avec contrôle de flux et récupération d'erreur.

## 2.10 Applications

Dans le modèle TCP/IP il n'existe ni couche session ni couche présentation. Les applications sont implémentées « au dessus » du transport, en utilisant typiquement les « sockets ».

Le modèle **client-serveur** gère de manière implicite l'organisation du dialogue entre les applications (analogue à la session). Après une phase préalable de connexion/négociation, le client émet une requête et attend la réponse du serveur. Une application est identifiée par le **port** TCP ou UDP (analogue à un TSAP OSI) qui permet de la joindre. L'adresse Internet d'une application est donc constituée par l'adresse IP de la machine qui l'abrite et un port de connexion (ex 129.182.45.67:21)

### 2.10.1 FTP File Transfer Protocol port 21

Transfert de fichiers - Utilise 2 sockets.

### 2.10.2 TELNET, TELcommunication NETwork port 23

Fournit des services de type présentation, permet de connecter des terminaux virtuels (VT100, terminal x, ...).

### 2.10.3 SMTP Simple Mail Transfer Protocol port 25

Messagerie électronique.

### 2.10.4 NNTP Network News Transfer Protocol port 119

Forum à base de messagerie.

### 2.10.5 HTTP Hyper Text Transfer Protocol port 80

Protocole d'échange d'hyper textes et de plus généralement d'objets informatiques.

### 2.10.6 SNMP Simple Network Management Protocol port

Protocole d'administration de réseau.

## 2.11 Le paradigme des sockets.

Un socket possède les attributs suivants

    La famille\_de\_protocole ( PF\_INET pour internet)

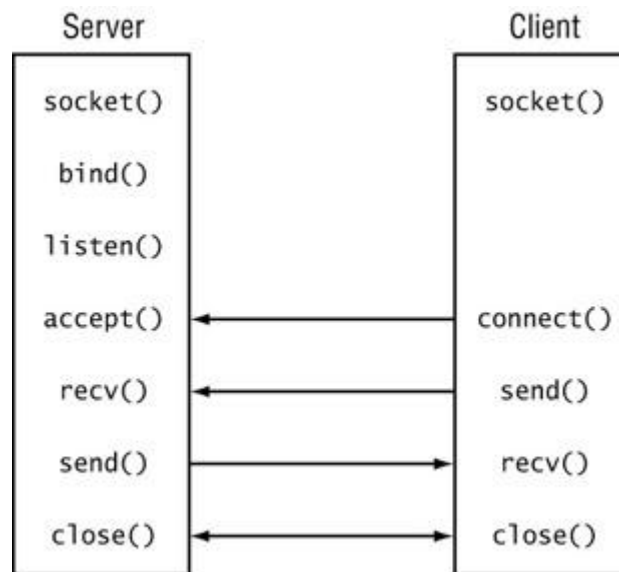
    Le type\_de\_socket (SOCK\_STREAM - mode connecté TCP, SOCK\_DGRAM - datagramme en UDP, SOCK\_RAW - trames ICMP)

    Le protocole (IPPROTO\_TCP, IPPROTO\_UDP, IPPROTO\_ICMP).

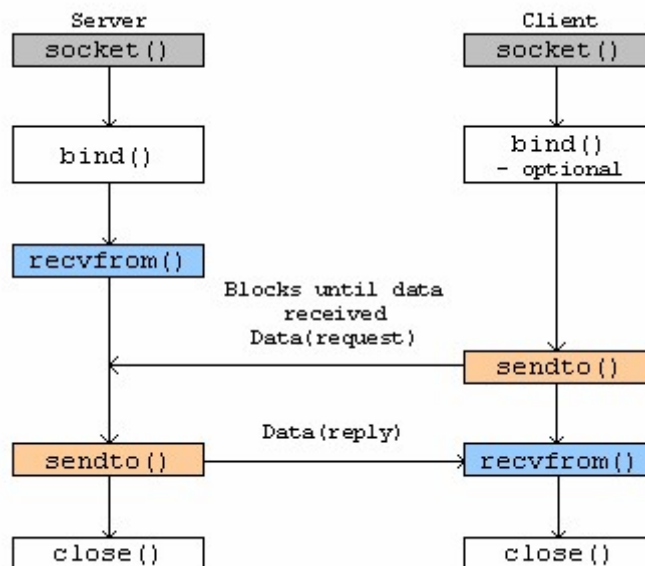
Ex : desc\_socket = socket(PF\_INET,SOCK\_STREAM,IPPROTO\_TCP)

Une adresse de socket se compose d'une adresse IP et d'un port de transport si nécessaire.

La création d'un serveur ou d'un client se décompose en plusieurs opérations.



Usage des sockets en mode connecté



Usage des sockets en mode non connecté

### 2.11.1 bind()

`bind(descr_socket, adresse_socket_locale, longueur_adresse)`, affecte une adresse à un socket.

### 2.11.2 listen()

`listen(descr_socket, longueur_queue)`, nombre de messages en attente.

### 2.11.3 accept()

`accept(descr_socket, adresse_de_socket, longueur_adresse)`, spécifie les adresses dont on accepte la connexion (par exemple `INADDR_ANY`).

### 2.11.4 connect()

`connect(descr_socket, adresse_socket_distante, longueur_adresse)`

### 2.11.5 closesocket(desc\_socket)

Abandon d'un socket.

### 2.11.6 send(),write()

Emission de données en mode connecté.

send(desc\_socket,adresse\_message,longueur\_message,indicateurs\_spéciaux).

write(desc\_socket,adresse\_message,longueur\_message).

### 2.11.7 sendto()

Emission de données en mode non connecté.

send(desc\_socket,adresse\_message,longueur\_message,indicateurs\_spéciaux,adresse\_socket\_distant,longueur\_adresse).

### 2.11.8 recv(),read()

Réception de données en mode connecté

recv(descr\_socket,adresse\_buffer,longueur\_buffer,indicateurs\_spéciaux).

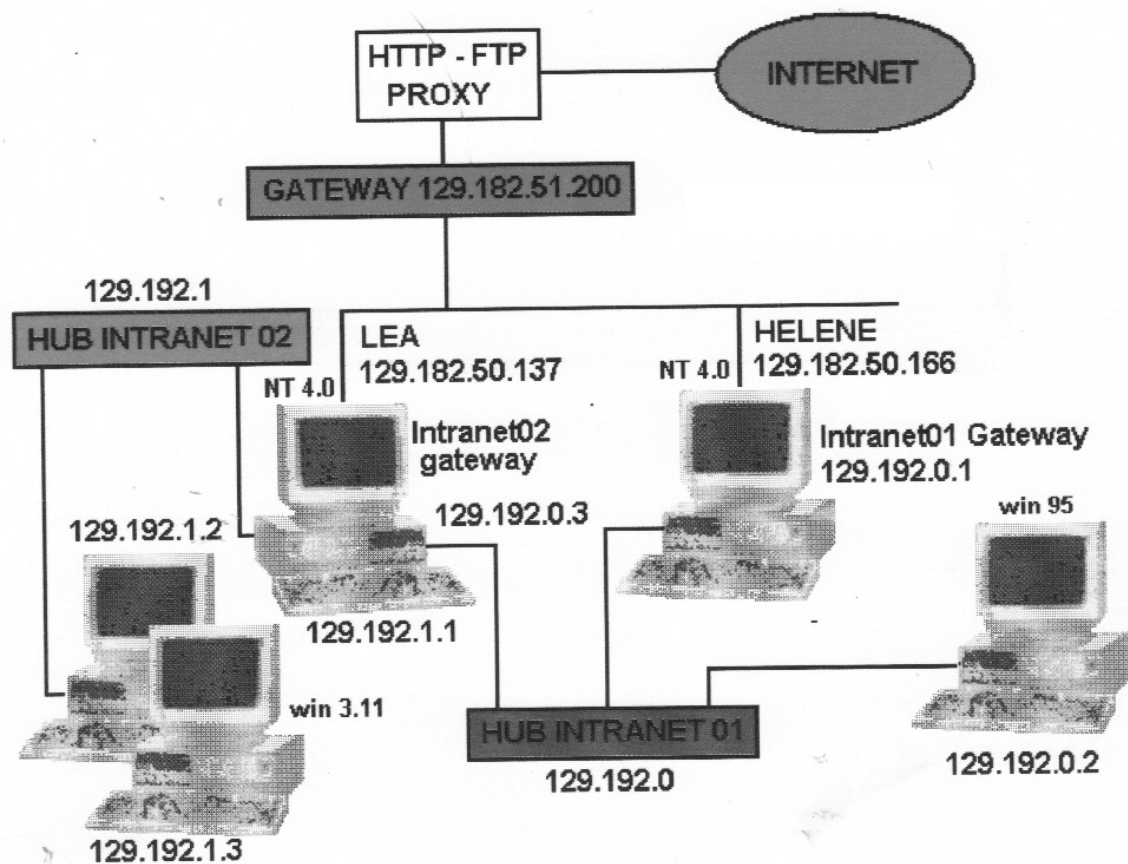
read(descr\_socket,adresse\_buffer,longueur\_buffer).

### 2.11.9 recvfrom()

Réception de données en mode non connecté.

recvfrom(descr\_socket,adresse\_buffer,longueur\_buffer,indicateurs\_spéciaux,adresse\_socket\_distant,longueur\_adresse).

## 2.12 Exemple de Routage



### Table de routage - HELENE

Adresse réseau	Masque réseau	Adresse passerelle	Interface	Metric
0.0.0.0	0.0.0.0	129.182.51.200	129.182.50.166	1
127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.182.50.0	255.255.254.0	129.182.50.166	129.182.50.166	1
129.182.50.166	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.182.255.255	255.255.255.255	129.182.50.166	129.182.50.166	1
129.192.0.0	255.255.255.0	129.192.0.1	129.192.0.1	1
129.192.0.1	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.192.1.0	255.255.255.0	129.192.0.3	129.192.0.1	1
224.0.0.0	224.0.0.0	129.192.0.1	129.192.0.1	1
224.0.0.0	224.0.0.0	129.182.50.166	129.182.50.166	1
255.255.255.255	255.255.255.255	129.182.50.166	129.182.50.166	1

### Table de Routage LEA

Adresse réseau	Masque réseau	Adresse passerelle	Interface	Metric
0.0.0.0	0.0.0.0	129.182.51.200	129.182.50.137	1
127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.182.50.0	255.255.254.0	129.182.50.137	129.182.50.137	1
129.182.50.137	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.182.255.255	255.255.255.255	129.182.50.137	129.182.50.137	1
129.192.0.0	255.255.255.0	129.192.0.3	129.192.0.3	1
129.192.0.3	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.192.1.0	255.255.255.0	129.192.1.1	129.192.1.1	1
129.192.1.1	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.192.255.255	255.255.255.255	129.192.1.1	129.192.1.1	1
224.0.0.0	224.0.0.0	129.192.0.3	129.192.0.3	1
224.0.0.0	224.0.0.0	129.182.50.137	129.182.50.137	1
224.0.0.0	224.0.0.0	129.192.1.1	129.192.1.1	1
255.255.255.255	255.255.255.255	129.192.1.1	129.192.1.1	1

### Table de routage Win95

Network Address	Netmask	Gateway Address	Interface	Metric
0.0.0.0	0.0.0.0	129.192.0.1	129.192.0.2	1
127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.192.0.0	255.255.255.0	129.192.0.2	129.192.0.2	1
129.192.0.2	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	1
129.192.1.2	255.255.255.255	129.192.0.3	129.192.0.2	1
129.192.255.	255 255.255.255.255	129.192.0.2	129.192.0.2	1
224.0.0.0	224.0.0.0	129.192.0.2	129.192.0.2	1
255.255.255.255	255.255.255.255	129.192.0.2	129.192.0.2	1

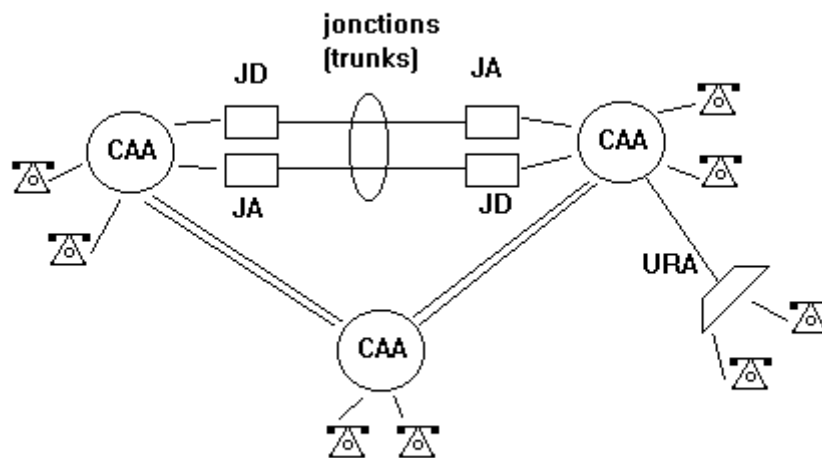
### 3. Le Réseau Téléphonique Commuté RTC

#### 3.1 Architecture générale.

Le réseau téléphonique est constitué d'autocommutateurs, répartis en trois niveaux :

- local
- national
- international

**Le niveau local** comporte des **CAA** (Centre à Autonomie d'Acheminement - local exchange - Central Office), dont un sous ensemble particulier nommé **URA** (Unité de Raccordement des Abonnés - RSS Remote Subscriber Switch) assure le raccordement des abonnés au moyen d'une ligne téléphonique.



Les jonctions (ou trunks) assurent les liaisons entre centraux. Divers médias peuvent être utilisés tels que liaisons filaires, coaxiales hertziennes, optique.

Les joncteurs sont les équipements d'interface entre CAA.

JD (départ), outgoing junction (outgoing calls)

JA (arrivée), incoming junction (incoming calls)

Le trafic téléphonique est exprimé usuellement en Erlangs, c'est à dire

$$n \text{ Erlangs} = N (\text{événement par sec}) *$$

(durée moyenne de l'événement)

Par exemple un usager qui émet/reçoit 3 appels par heure de durée moyenne 120 secondes génère une densité de trafic de

$$\text{Trafic} = 3/3600 * 120 = 0.1 \text{ Erlangs}$$

En particulier une ressource qui reçoit  $1/n$  appels/s dont la durée moyenne est de  $n$  secondes génère un trafic de 1 erlang.

On montre que le taux de perte  $p$  pour un trafic de  $E$  erlangs s'écrit

$$p = E^m / m! / \left( \sum_{k=0}^{k=m} E^k / k! \right) \quad (\text{formule d'Erlang})$$

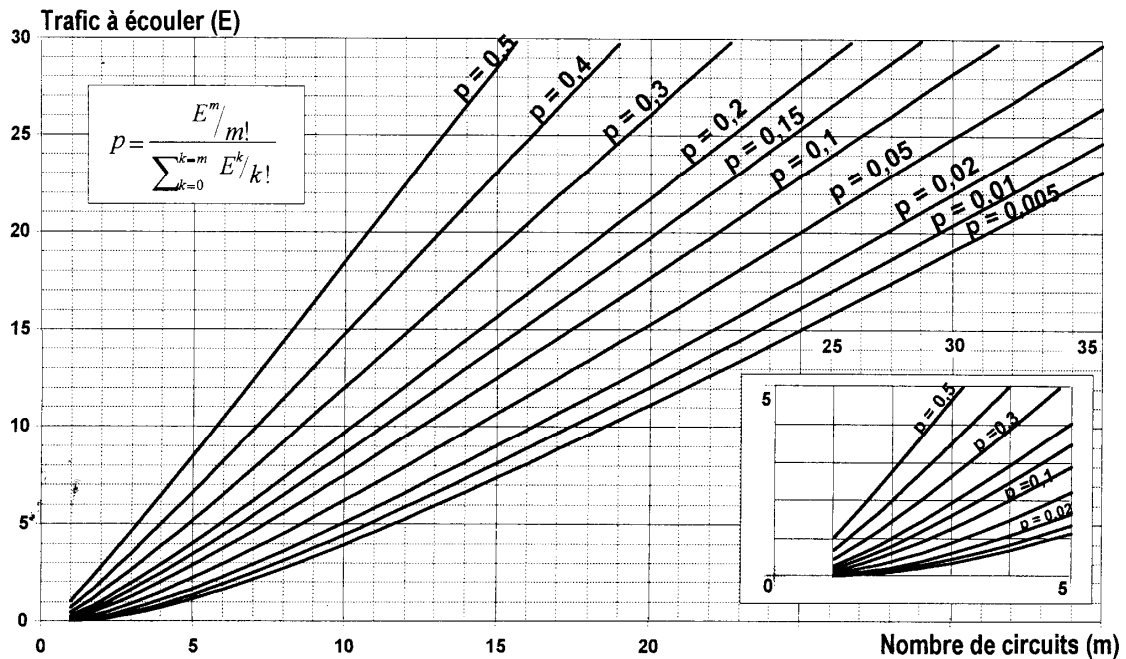
où  $m$  représente le nombre de ressources (ou circuits) (File d'attente M/M/c/c)

*Exemple*

pour 1 circuit la probabilité de blocage (refus d'appel) est  $E/(1+E)$

pour  $E$  voisin de zéro,  $p \approx E^m / m!$

## ABAQUE d'ERLANG



Il est possible de relier deux CAA à l'intérieur d'une zone locale.

Le niveau national est constitué de **zones** reliées par des centres de transit (une zone est ensemble de CAA reliés à un CTS). Les Centres de Transit Secondaire (**CTS**, tandem office) améliorent l'efficacité du maillage entre CAA d'une même zone. Les CTS sont reliés aux CAA, à d'autres CTS, ou bien à des Centres de Trafic Primaire (**CTP** - toll office). Il convient de remarquer que les abonnés ne sont pas reliés directement au centre de transit (primaire ou secondaire).

Les **CTP** gèrent le trafic entre CTS

Enfin le troisième niveau est constitué d'un Centre de Transit International (**CTI** - International Transit Exchange), qui est élément du réseau international.

### 3.2 Interface URA abonné.

Cette interface est communément appelée (coté URA) **BORSCHT**,

**B**attery Feeding, alimentation du combiné téléphonique.

**O**vervoltage Protection, protection contre les surtensions (foudre...)

**R**inging, sonnerie

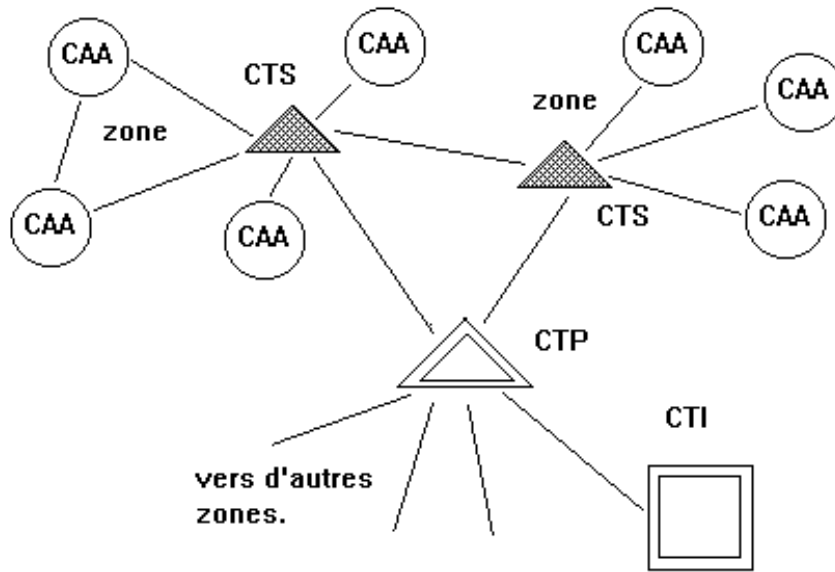
**S**ignaling, signalisation

**C**oding, codage du son sous forme binaire

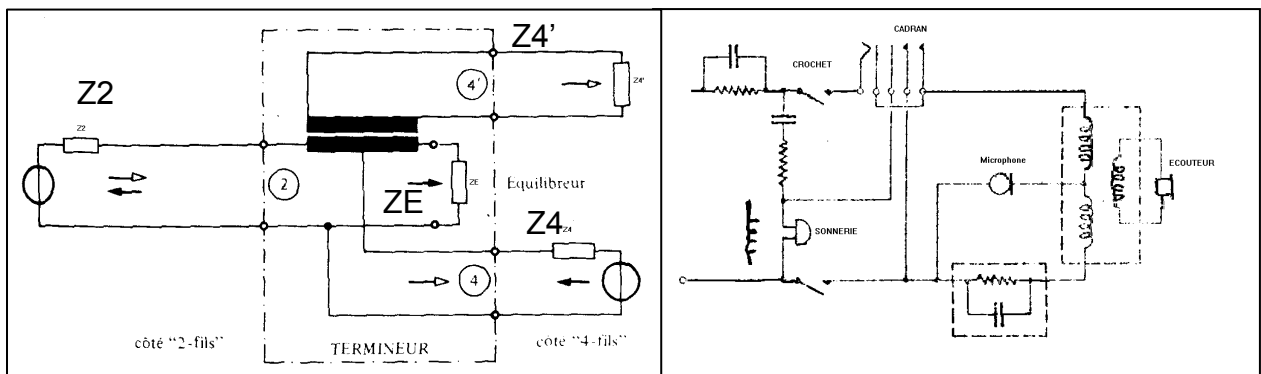
**H**ybrid, conversion 2 fils 4 fils.

**T**esting, test





### 3.3 Le combiné téléphonique classique, signalisation d'abonné.



Pour une atténuation de 3dB  
 $Z2 = ZE$ ,  $Z4' = 2 \cdot Z2$ ,  $Z4 = Z2 / 2$

Cet ensemble est alimenté sous une tension de 48v ou 96v continu. La détection du décrochage (**fermeture de boucle**) est réalisée pour un courant de boucle compris entre 19mA et 60mA. Le courant consommé lorsque le combiné est raccroché (boucle ouverte) doit être inférieur à 2.5 mA.

La tension de sonnerie a pour valeur 80v efficace à 50Hz ou 25 Hz.

La conversion 2 fils 4 fils est réalisée par un dispositif dit **hybrid**, la perte d'énergie est alors de 3dB (la moitié de la puissance émise/reçue) dans chaque voie.

La polarité de la batterie d'alimentation peut être inversée, pour notifier un service sans taxation ou la libération de l'appel.

Un signal de fréquence 12Khz, de durée 125ms, et d'amplitude côté récepteur de l'ordre de 2V est utilisé pour le service de taxation à domicile.

L'impédance dynamique du poste est de l'ordre de 600 ohms.

L'ouverture de boucle rapide (ou **flash**) est utilisée pour des services divers (mise en garde ...)

#### **Le numéro d'appel peut être notifié**

- Par ouverture de boucle, un chiffre n est constitué d'une séquence de n ouverture (66 ms)/fermeture(33ms), deux chiffres sont séparés par une fermeture de boucle de 300ms.
- Par fréquence vocale, un chiffre est constitué par deux fréquences ( 2 parmi deux groupes de 4,  $4.4 = 16$ , le débit est de l'ordre de 50 bits/s)

La bande passante est comprise entre 300Hz et 3,400Hz.

### **3.4 Notion de commutation spatio-temporelle.**

La voix est codée sous formes de mots de 8 bits, générés toutes les 125  $\mu$ s. Une voie physique est divisée en intervalles de temps égaux (IT ou Time Slot), chaque intervalle est numéroté (de 0 à N-1), on obtient donc dans le temps une suite d'intervalles  $IT_k$ . Chaque IT contient un échantillon appartenant à un appel donné, et donc la période d'apparition d'un  $IT_k$  donné est de 125  $\mu$ s. Le débit total d'une voie physique est donc  $8000 * 8 * N$  bits/s.

Le commutateur associe au couple (n°voie, n°IT) entrant un couple (n°voie, n°IT) sortant. Un couple (n°voie, n°IT) est souvent dénommé **Circuit Virtuel** (CV), en souvenir des commutateurs qui n'effectuaient que commutations de circuits spatiaux (au moyen de relais, ou commutateurs crossbar).

### **3.5 Signalisation et liaisons entre autocommutateurs.**

La trame du système PCM primaire européen comporte 32 intervalles, l'intervalle 16 est affecté à la signalisation et l'intervalle 0 à la synchronisation. Donc 30 ITs utiles sont disponibles. Le débit primaire européen est donc 2.048 Mbit/S (format **E-1**).

Le système primaire américain comporte 24 intervalles plus un bit, soit un débit de  $(24.8 + 1) * 8000 = 1.544$  Mbit/s (**canal DS-1**).

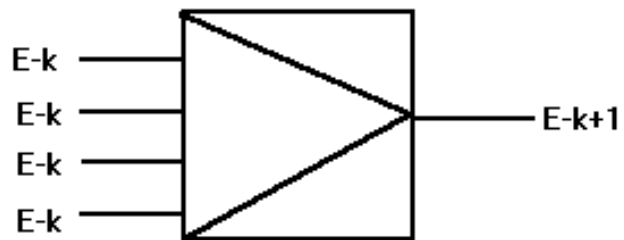
Les **trunks** entre centraux sont constitués typiquement de trame du système primaire, la voie de signalisation est utilisée pour échanger des informations relatives par exemple à l'établissement/fermeture d'un appel.

La signalisation entre centraux peut être réalisée par ailleurs par le protocole **CCITT n°7**, qui utilise son propre réseaux (CCIS, on parle de signalisation hors bande) pour échanger les informations de signalisation).

Le CCIS (Common Channel Interoffice Signaling) est un ensemble de liaisons (circuits) utilisé pour échanger des informations de signalisation.

A partir du multiplexage de base (E-1 ou DS-1) on obtient une hiérarchie de débits, (multiplex secondaire) baptisée **PDH** (Plesiochronous Digital Hierarchy), ainsi pour l'Europe:

- E-1 = 2 Mbit/s
- E-2 = 8 Mbits/s
- E-3 = 34 Mbit/s
- E-4 = 140 Mbit/s
- E-5 = 565 Mbit/s



Un multiplex E-k+1 est obtenu a partir de 4 multiplex E-k, les débits ne sont pas des multiples du canal de base en raison de l'ajout de divers bits de synchronisation.

La nécessité d'interconnecter des réseaux entre continents, l'apparition de nouveaux protocoles tels que ISDN (Integrated Services Digital Network, ou RNIS Réseau Numérique à Intégration de Service), ont conduit à la définition de nouveaux formats de trames (normalisés par L'IUT-T), par exemple **SONET** et **SDH**.

### 3.5.1 SONET

Synchronous Optical NETwork est une technique de transport destinée aux réseaux RNIS. La trame SONET de base comporte 9 rangées de 90 octets (3 octets de contrôle + 87 octets utiles). Une trame est périodique, de période 125 us.

octet	octet	octet	87 octets
-------	-------	-------	-----------

Le débit de cette trame nommée **STS-1** est appelé **OC-1**, c'est le niveau de base pour les réseaux internationaux.

Le débit OC-1 est donc de  $90 \times 9 \times 8 \times 8000 = 51.84$  Mbits/s.

Les trames **STS-N** comportent 9 rangées de N\*90 octets (3 octets de contrôle+87 octets). Le débit associé est **OC-N** ( $N * OC-1$ ). Les valeurs normalisées sont 1,3,9,12,18,24,36,48,96,192. En particulier OC-3 (155.622 Mbit/s), OC-12 (622.08 Mbit/s), OC48 (2488,32 Mbit/s) sont les débits retenus pour les accès aux réseau ATM.

### 3.5.2 SDH

Les trames Synchronous Digital Hierarchy sont périodiques, de période 125 us. La trame de base (**STM-1**, Synchronous Transport Module, niveau 1) comporte 9 rangées de 270 octets (9 octets d'en tête + 261 octets utiles). Le débit associé est donc de 155.520 Mbit/s (soit le débit OC-3). La trame **STM-N** comporte 9 rangées de N.270 octets (9 + 261). Les valeurs normalisées de N sont 1,3 , 4, 6, 8, 12, 16, 32, 64.

### 3.6 RNIS.

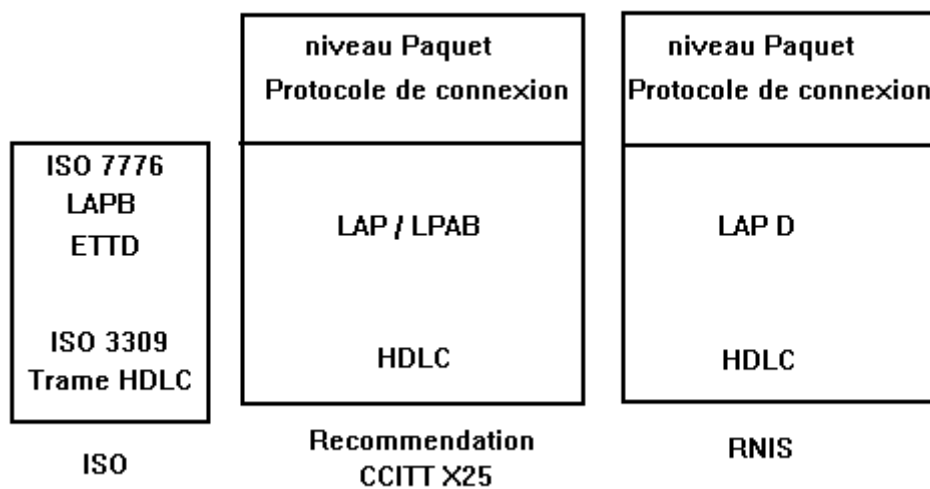
Dans le réseau téléphonique classique l'information est numérique dans son transport à travers le réseau, mais redevient analogique chez l'utilisateur, ce qui nécessite par exemple l'usage de modem pour échanger de l'information digitale. L'idée du RNIS est de conserver l'information numérique de bout en bout, ce qui signifie en particulier que l'abonné reçoit un train binaire et non un signal analogique.

On distingue deux types de débits, le **BRI** (Basic Rate Interface) dont le prix est sensiblement équivalent à une connexion téléphonique classique, et le **PRI** (Primary Rate Interface).

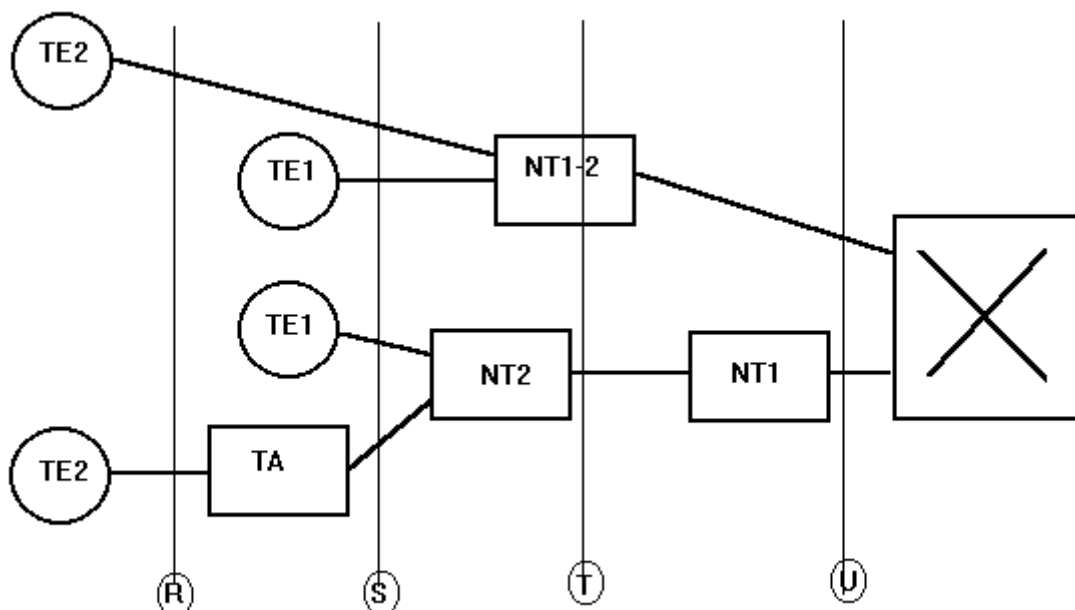
RNIS distingue deux types de canaux:

- Le canal B (Bearer) dont la capacité est de 64 Kbit/s. Les canaux H sont des canaux dont le débit est un multiple de 64 kbit/s, par exemple H11 (23 canaux B) ou H12 (30 canaux B). Tous les services utilisateurs sont disponibles sur le canal B
- Le canal D (Data) est adapté à des applications asynchrones de faible débit, c'est le canal utilisé par la signalisation et les services internes au réseau. Le débit est de 16 Kbit/s pour le BRI et 64 Kbit/s pour le PRI.

L'information du canal D est utilisée pour le **Out of Band Signaling**.



### 3.6.1 Le modèle RNIS.



**Les Terminal Equipment (TE)** sont connectés au réseau ISDN. On distingue deux types de TE.

- **TE1**, un équipement qui intègre une interface native TE1, et donc conçu pour se connecter directement à RNIS.
- **TE2**, un équipement qui ne comporte pas une interface native TE1. Dans ce cas un **TA** (Terminal Adapter) réalise la conversion nécessaire. L'interface TE2/TA est appelée interface **R**

**L'interface S** est l'interface utilisateur, il existe trois interface S0, S1, S2.

- L'interface de base est **S0** ( 2B+D16) (144 Kbit/s).
- Des interfaces de différents supérieurs sont disponibles , **S1** aux US (23B+D64, soit 1535 Kbit/s), ou **S2** en Europe (30B+D64, soit 1984 Kbit/s).

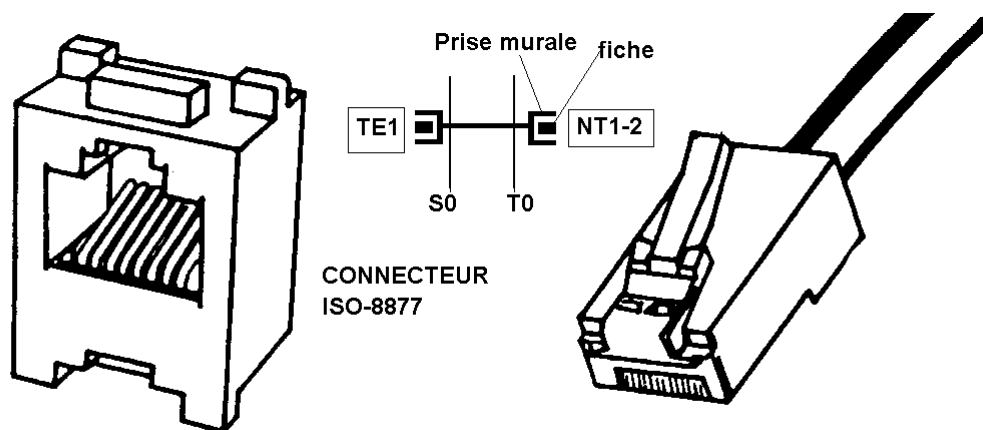
**L'interface T** matérialise la limite entre l'utilisateur privé et l'opérateur de télécommunications (France télécom par exemple). De ce fait il est nécessaire de rajouter des bits de synchronisation et de partages de canaux. On obtient les débits suivants:

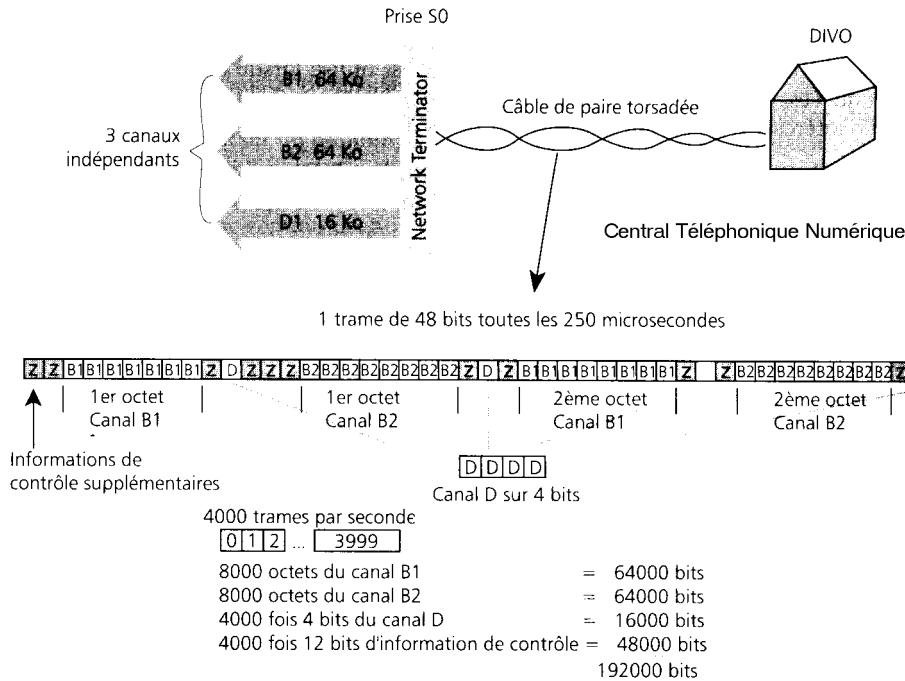
- **T0**, S0 + 48Kbit/s, soit un débit de 192 Kbit/s (BRI).
- **T1**, S1 + 8 Kbit/s, soit un débit de 1544 Kbit/s (PRI)
- **T2**, S2 + 64 Kbit/s, soit un débit de 2048 Kbit/s (PRI)

La trame d'accès primaire comporte 32 ITs, IT0 pour le verrouillage de trames et divers services, IT16 pour le canal B, les autres ITs sont affectés aux canaux B

L'interface U relie le dispositif NT1 à un commutateur ISDN.

Un **PABX est par exemple un dispositif NT2**, qui possède des terminaux TE1 ou TE2. Les terminaisons de type NT1 ou interface U sont en fait gérés par l'opérateur de télécom (**carrier**). Il est possible d'obtenir une **interface S0** à partir d'une terminaison de type NT1-2.

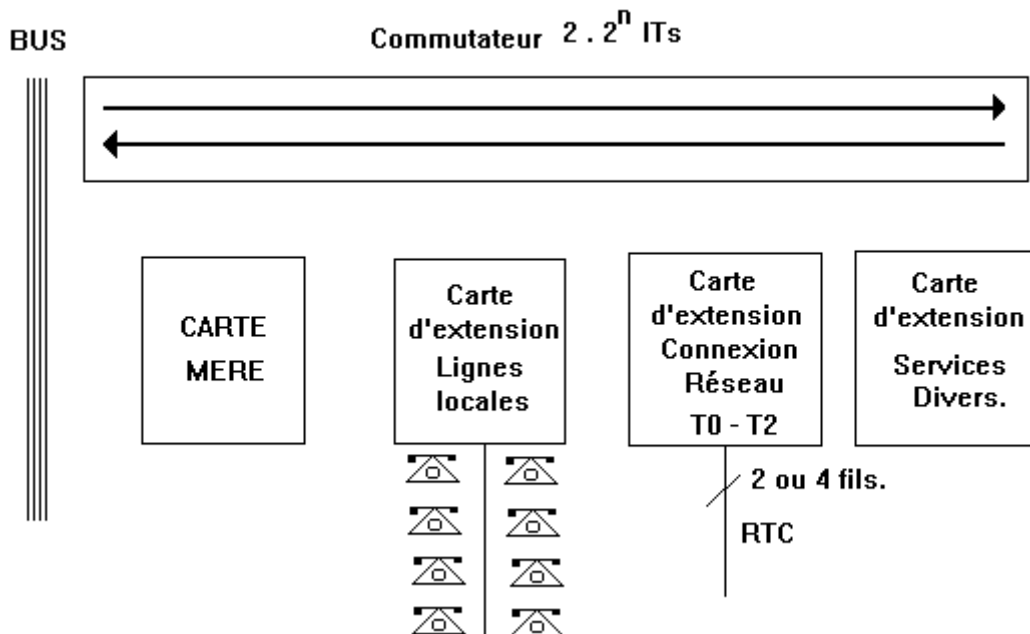




### 3.7 Les PABX (autocommutateurs privés)

Les **Private Automatic Branch Exchange** relient un réseau téléphonique privé au réseau téléphonique public. De manière générale le PABX offre aux utilisateurs du réseau privé des services additionnels tels que messagerie vocale, etc ...

#### 3.7.1 Architecture type d'un PABX.



Un PABX est organisé autour d'une carte mère (Unité Centrale Principale) qui gère (et réalise) un commutateur, et un bus d'interconnexion. L'administration des cartes d'extension est réalisée à travers le bus, Les caractéristiques du PABX sont

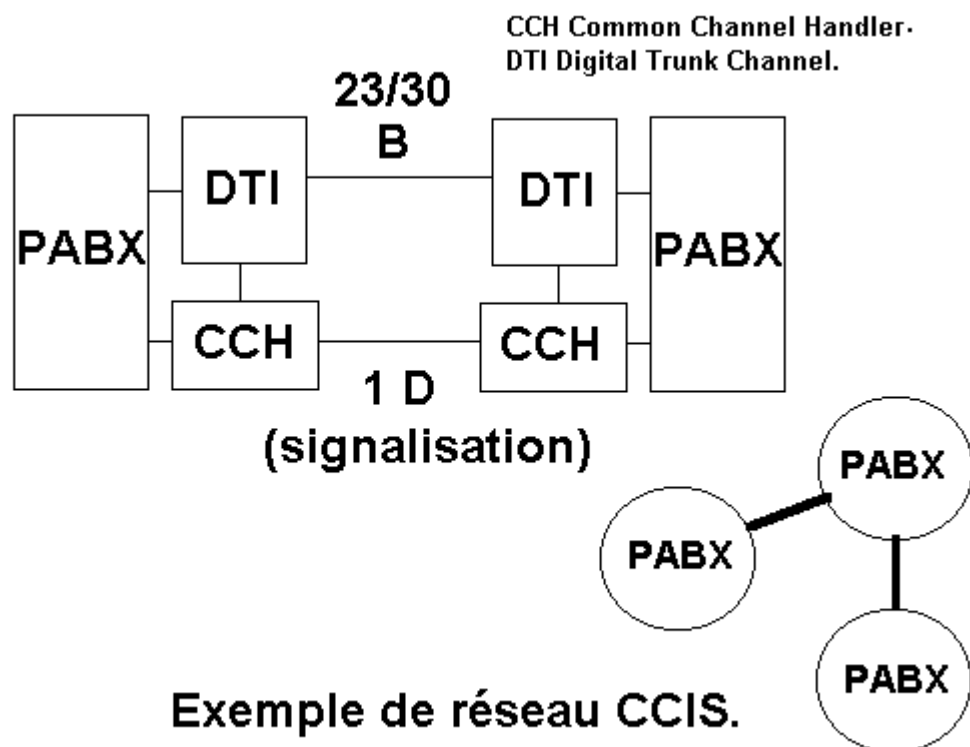
modulables en fonction du nombre et de la nature des cartes d'extension installées, par exemple:

- Gestion d'un ensemble de 8 lignes d'abonnés.
- Connexion au réseau RNIS par interface T0 ou T2.
- Connexion au RTC par ligne analogique.
- Services divers (traitement d'appel ...).

Si l'on nomme **port** un couple de 2 ITs une communication interne consiste à relier 2 **ports** à travers le commutateur, une communication externe relie un port interne au réseau publique.

### 3.7.2 Réseaux de PABX.

Un réseau privé peut être étendu en reliant des PABX. La signalisation peut se faire voie par voie (IT 16 d'une trame MIC), ou par un réseau de signalisation **Out Of Band** (canal sémaphore) Le protocole de signalisation est dans ce cas différent d'un constructeur à l'autre, Le protocole **Q-Sig**, dérivé de **Q-931** (un protocole de l'UIT-T pour l'interconnexion entre centraux privés et publiques) devrait permettre de raccorder des PABX hétérogènes (Q-Sig est aux PABXs ce que CCITT n°7 représente pour l'interconnexion des autocommutateurs RNIS.).



### 3.8 Le CTI, Computer-Telephone Integration.

L'objectif du CTI est de rajouter à l'aide d'un système hôte extérieur des fonctionnalités supplémentaires au PABX. La tendance actuelle est d'utiliser une machine type windows, mais certaines applications utilisent également des systèmes UNIX.

### 3.8.1 SMDR

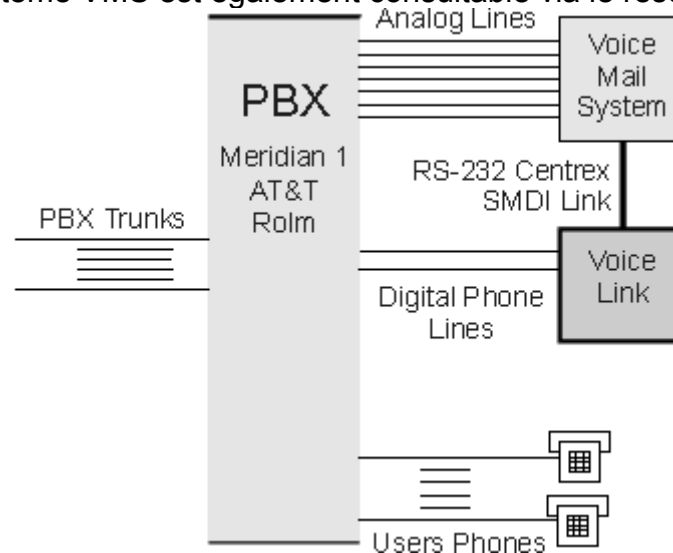
Le Station Message Detail Recording (SMDR) est classiquement une suite de données ASCII associée à chaque appel qui comporte les informations suivantes:

- Numéro appelant/appelé
- Heure de début fin d'appel
- Coût de la communication ...

Ces informations sont disponibles via une liaison série (RS232 ...), et peuvent être imprimées ou traiter par un client particulier (windows par exemple, pour archivage dans une BD et traitement ultérieur).

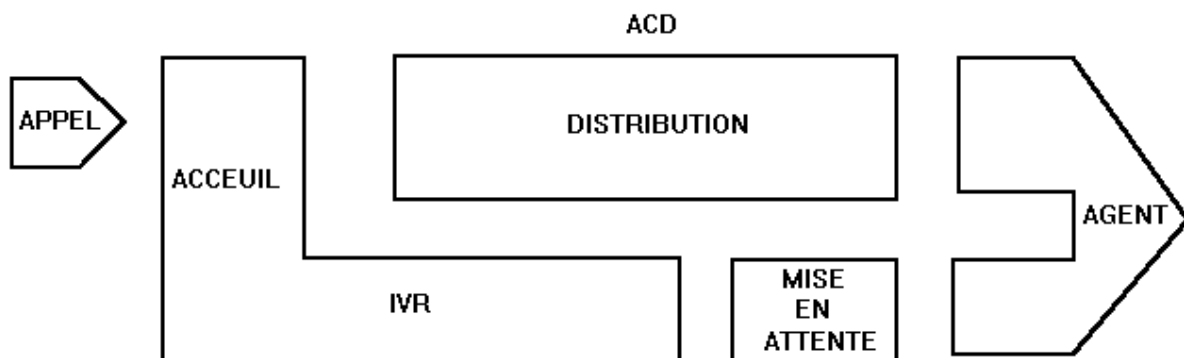
### 3.8.2 VMS

Le Voice Messaging System (**VMS** - messagerie vocale) se présente sous forme d'un groupe de lignes téléphoniques (du PABX) raccordées à un système VMS. Lorsque une ligne est occupée ou ne répond pas le PABX déroute l'appel vers les lignes affectées au VMS. Un menu déroulant vocal permet alors l'enregistrement de messages. Le système VMS est également consultable via le réseau privé



### 3.8.3 ACD

Automatic Call Distribution (**ACD**) consiste en la programmation des appels entrants. Ces derniers sont placés dans des files d'attentes et dirigés vers un opérateur particulier en fonction d'instructions prédéfinies. Ce service est par exemple utilisé par les **centres d'appels** (call center) parfois en conjonction avec **IVR**.





### **3.8.4 IVR**

L'IVR (Interactive Voice Response - Unité de réponse vocale interactive) consiste en la diffusion de menu déroulant vocaux, l'appelant sélectionnant une réponse par un code DTMF particulier.

### **3.8.5 Audiotext.**

L'audiotext est signal sonore numérisé diffusé lors de l'utilisation d'un service spécifique.

## 4. Le réseau GSM

### 4.1 Historique

1901, 1<sup>o</sup> liaison radio entre Cornouailles et Terre Neuve, réalisée par Guglielmo Marconi.

1950, Bell Telephone crée un service de radio téléphone.

1964 partage de ressources (bande de fréquence) dans un réseau de radio téléphone

1971 concept de réseau cellulaire

1978, le réseau **Advanced Mobile Phone Service** (Bell Telephone) est opérationnel à Chicago.

1982 normalisation par la Federal Communication Commission du réseau *Advanced Mobile Phone Service*

France Télécom définit la norme Radiocom 2000.

1982 le **CEP** (Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunication) crée le groupe Spécial Mobile (**GSM**).

- La bande 890-915 Mhz est attribuée pour l'émission des stations mobiles.
- La bande 935-960 Mhz est attribuée pour l'émission des stations fixes.

En 1987 les principales caractéristiques du réseau GSM sont définies :

- transmission numérique
- multiplexage temporel des canaux radio.
- chiffrement des informations sur le canal radio.
- nouvelle loi de codage de la parole à débit radio.
- la taille des cellules est de 200m à 35 km.

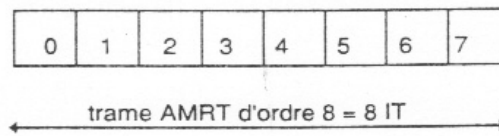
1989, transfert du GSM au comité SMG de l'**ETSI** (European Telecommunication Standards Institute), le sigle GSM se transforme en **Global System for Mobile communications**. **Cinq** sous groupes composent le SMG,

- les services
- l'interface radio
- le réseau
- le transfert de données
- le module d'identité d'abonné (*Subscriber Identity Module*, **SIM**), c'est à dire une carte à puce.

1990 introduction de la technique Time Division Multiple Access (**TDMA**) ou encore Accès Multiple à Répartition dans le Temps (**AMRT**).

L'efficacité du GSM est de 1.35 bps/Hz

Une trame AMRT d'ordre 8 se décompose en 8 intervalles de temps (8 IT)



#### 4.2 Le concept de réseau cellulaire.

Soit  $P_e$  la puissance d'un émetteur, si cette puissance est émise de manière uniforme (dans un angle solide  $d\Omega$ ) alors

$$dP/d\Omega = P_e / 4\pi \text{ (stéradian)} = \text{constante}$$

La puissance ( $P_r$ ) reçue par une surface  $S$ , en l'absence d'atténuation est donc

$$P_e = (P_r / 4\pi) S/d^2$$

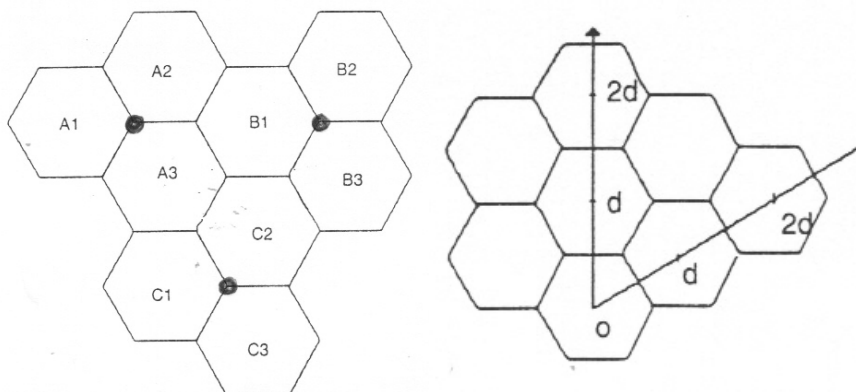
ou en tenant compte d'une absorption atmosphérique ( $a$ )

$$P_e = (P_r / 4\pi) S/d^2 e^{-d/a}$$

La puissance reçue varie donc de manière inversement proportionnelle au carré de la distance (sans pertes). La puissance reçue à une distance  $d$  suit une loi (empirique) en  $d^{-3,5}$  dans des conditions atmosphériques standard

On considère que pour une distance caractéristique supérieure à  $d$  le signal  $P_e$  émis n'est plus reçu.

Le réseau est maillé sous forme de **cellules** de forme hexagonale. Un **motif** est composé de 9 cellules utilisant toutes des fréquences différentes. En général les **stations fixes** sont localisées aux points d'intersection de trois cellules.



La **mobilité** de l'utilisateur impose les contraintes suivantes

- **localisation** de l'abonné dans le réseau avant la communication
- estimation des **déplacements** de l'abonné (transfert de communication inter cellulaire ou *handover*).
- Maintien de la liaison durant un changement de cellule. *Une station mobile peut communiquer avec deux stations de base simultanément.*

### 4.3 La norme GSM

La norme GSM offre catégories de services, à savoir

- Les services supports
- Les télé-services
- Les services supplémentaires

Les différents éléments du réseau sont les suivants :

- Les stations mobiles (handset)
- Les *Base Transceiver Station (BTS)*, groupement d'émetteurs et de récepteurs fixes.
- Le contrôleur de BTS, Base Station Controller (**BSC**). Ces éléments sont une passerelle vers le sous système réseau
- Le commutateur Mobile Switching Center (**MSC**)
  - Le **HLR** (*Home Location Register*) qui abrite la base de données des utilisateurs du réseau (type d'abonnement ...) et le *Authentication Center (AUC)* qui stocke les codes confidentiels des abonnés.
- Le **VLR** (*Visitor Location Register*) qui enregistre des informations dynamiques relatives à une station mobile de passage.

#### 4.3.1 Les services supports.

On trouve dans ce sous ensemble

- **les attributs de transfert d'information**
  - Mode de transfert de l'information (circuit, paquet)
  - Débit de transfert
  - Type d'information (numérique, parole ...)
  - Structure
  - Mode d'établissement de la communication
  - Configuration de la communication (point à point, multipoint, diffusion ...)
  - Unidirectionnel, Bidirectionnel.
- **les attributs d'accès**
  - Canal et débit d'accès
  - Protocoles d'accès (information et signalisation)
- **les attributs généraux.**
  - Services supplémentaires assurés
  - Qualité de service
  - Possibilité d'inter fonctionnement
  - Opérationnels et commerciaux.

Les attributs d'accès et généraux identifient un **service support**

- Transmission de données, mode asynchrone duplex, 300/9600 bit/s
- Transmission de données mode synchrone duplex, 300/9600 bit/s
- Accès asynchrone à un PAD, 300/9600 bit/s
- Transmission de paquets en mode synchrone duplex, 2400/9600 bit/s
- Transmission numérique de la phonie à l'alternat, 2400/9600 bit/s

Le GSM supporte les modems V21, V22, V23 (minitel), V26, et V32 (4800/9600 bit/s).

#### 4.3.2 Les télé-services

Les **téléservices** sont les applications opérationnelles offertes au réseau à ses abonnés, et basées sur les services supports

- Téléphonie
- Appels d'urgence, 112
- Données, accès à 300 bit/s, accès à 1200 bit/s
- Transmission de messages alphanumériques (max. 140 octets)
- Graphique, télécopie de groupe 3

#### 4.3.3 Services Supplémentaires

Se sont des services usuels dans le monde de la téléphonie

- renvoi d'appel
- identification de l'appelant
- mise en garde d'appels

...

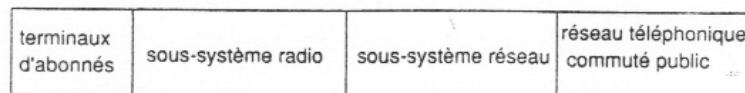
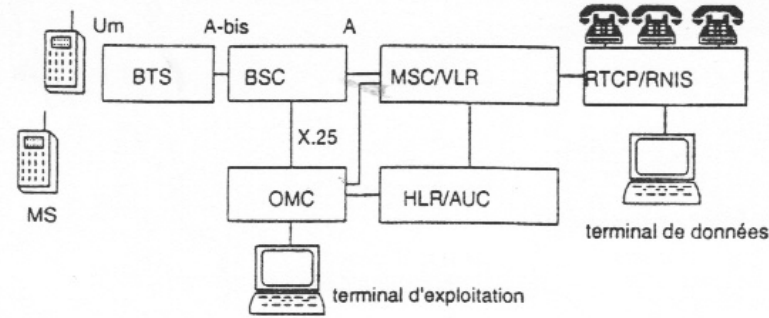
#### 4.3.4 Techniques de multiplexage

Deux techniques sont mises en œuvre simultanément :

- Accès Multiple à Répartition dans le Temps (AMRT)
  - 8 IT de 577  $\mu$ s constituent une trame de 4.615 ms
- Accès Multiple à Répartition de Fréquence (AMRF)
  - Les plages de fréquences (890-915Mhz) et (935-960Mhz) sont découpées en 124 canaux de 200 kHz (soit une largeur de bande de 24.8 Mhz)

Une communication est affectée à un IT fixe sur une voie montante et descendante, par contre la relation entre IT et fréquence est dynamique (sécurité, interférence ..)

## 4.4 Infrastructure



MS	Terminal d'abonné (Mobile station)
BTS	Station de base (Base Transceiver Station)
BSC	Contrôleur de station de base (Base Station Controller)
OMC	Centre d'exploitation et de maintenance (Operation and Maintenance Centre)
HLR	Enregistreur de localisation nominal (Home location Register)
AUC	Centre d'authentification (AUthentication Centre)
MSC	Commutateur du réseau GSM (Mobile Switching Centre)
VLR	Enregistreur de localisation des visiteurs (Visitor Location Register)
RTCP	Réseau Téléphonique Commuté Public
Um	Interface radio MS ↔ BTS
A-bis	Interface BTS ↔ BSC
A	Interface BSC ↔ MSC

### 4.4.1 BTS

Une station BTS assure la couverture radio d'une cellule et gère au plus 8 communications (trame AMRT). Le rayon d'une cellule varie entre 200m et 30 km.

### 4.4.2 BSC

Il gère une plusieurs BTS et définit les fréquences utilisées. Il est également responsable de la gestion du franchissement des cellules.

### 4.4.3 MSC

Ce commutateur assure l'interconnexion du réseau GSM avec le réseau téléphonique public. Il offre un accès vers HLC/AUC a des fins d'authentification d'un utilisateur.

### 4.4.4 HLR

Cette base de données contient des informations sur l'abonné et le terminal utilisé. Les cartes d'abonnements SIM permettent à un abonné d'utiliser un terminal quelconque, il existe donc une différence entre abonné et terminal. Plusieurs instances de HLR peuvent exister dans le réseau.

### 4.4.5 AUC

Cette base de données stocke des informations confidentielles sur un abonné. L'identification d'un abonné se fait en deux étapes

- de manière locale, par le code de la carte SIM (PIN code)

- à travers le réseau, à l'aide d'un algorithme secret exécuté simultanément par la carte SIM et AUC.

#### 4.4.6 VLR

Cette base de données contient des informations sur les abonnés présents dans le réseau, elle est associée au commutateur MSC. Le réseau met à jour HLR en fonction de VLR.

#### 4.4.7 Network Subsystem NSS

C'est l'ensemble formé par MSC, AUC, VLR, HLR

#### 4.4.8 OMC

Assure la gestion et l'exploitation du réseau, en relation avec HLR. Les services principaux sont la gestion des abonnements et naturellement la facturation.

#### 4.4.9 Transmission radio

##### 4.4.9.1 Hiérarchie

multitrame26	=	26 trames AMRT
multitrame51	=	51 trames AMRT
supertrame51	=	51 multitrames 26
supertrame26	=	26 multitrames 51
hypertrame	=	2048 supertrames

##### 4.4.9.2 Typologie

On distingue quatre types de paquets identifiés par un **TB** (tail bit) de 3 bits (cas général) ou 8 bits (paquet d'accès)

- paquet d'accès,
- paquet de synchronisation
- paquet normal
- paquet de correction de fréquence

Un paquet est inséré dans un intervalle de temps IT de 577  $\mu$ S et est équivalent à 156.25 bits, c'est à dire que le débit brut d'un IT est de **270 kbit/s**, mais le débit maximum utile pour un abonné est de **13 kbit/s**

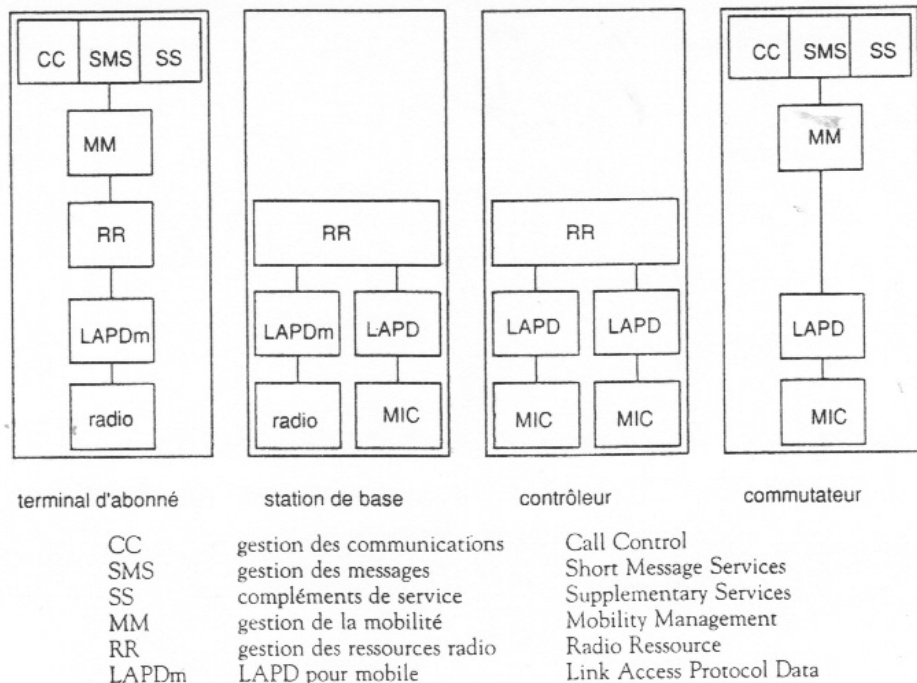
##### 4.4.9.3 Canaux logiques

Les canaux logiques sont transportés par les IT de 577  $\mu$ S, on distingue deux types de canaux :

- canaux de trafic (Trafic **CH**annel - TCH)
  - **TCH/FS, parole plein débit 13 kbit/s**
  - TCH/HS, parole demi-débit (1 paquet/2) 6.5 kbit/s
  - **TCH/F 9,6 données 9600 bit/s plein débit**
  - TCH/F 4,8 données 4800 bit/s plein débit
  - TCH/F 2,4 données 2400 bit/s plein débit
  - TCH/H 4.8 données 4800 bit/s demi débit
  - TCH/H 2.4 données 2400 bit/s demi débit
- canaux de signalisation
  - Canaux de diffusion (**B**road**C**asting **CH**annel - BCCH)

- canaux de contrôle commun
- canaux dédiés
- canaux associés

#### 4.5 Pile protocolaire et sous système radio



Les piles de protocoles dans la station mobile et le sous-système réseau

##### 4.5.1 Protocoles pour la signalisation

Quatre types de protocoles de niveau 2 sont utilisés pour la signalisation

- LAPDm (mobile) pour les liaisons avec le mobile.
- LAPD, interface A-Bis entre BTS et BSC, définie sur une liaison MIC à 2 Mbit/s (4 canaux 13 kbit/s par canal 64 kbit/s MIC)
- CCITTn°7/LAPD, interface A entre BSC et MSC, définie sur une liaison MIC à 2 Mbit/s
- Interface X25 entre MSC et OMC.

##### 4.5.2 Sous système radio

- La **station de base** gère de 1 à 8 porteuses radio. Une porteuse radio offre huit canaux radio à plein débit et comporte le plus souvent une **antenne sectorielle qui couvre 120°**. En zone urbaine une station de base gère trois cellules, avec au maximum 8 porteuses radio par cellules, c'est à dire  $8 \cdot 3 \cdot 8 = 192$  canaux radio. L'interface avec le BSC permet de multiplexer jusqu'à 80 canaux (13 kbit/s).
- Le contrôleur de station de base **BSC** gère un **motif** et assure les liaisons à travers une **interface X25** avec **OMC** et **NSS**.

#### 4.6 Le sous système réseau

Un sous système réseau est le lien entre le sous système radio GSM et le réseau téléphonique commuté. MSC est l'élément majeur de ce sous ensemble.

MSC possède trois types de base de données HLR, VLR, AUC.



Le HLR/AUC d'un abonné est fixe, un appel est donc en premier lieu acheminé vers cet élément. La localisation exacte de l'abonné est connue grâce aux informations émises par le VLR de sa cellule d'accueil.

## **4.7 Les Terminaux**

### **4.7.1 Quelques caractéristiques**

Il existe cinq classes de terminaux en fonction de la puissance émise

- classe 1 20 watts
- classe 2 8 watts
- classe 3 5 watts
- classe 4 2 watts
- classe 5 0.8 watts

•

Un terminal peut réduire sa puissance d'émission par pas de 2dB sur commande de la station de base. La sensibilité est de 104 dB (100  $\mu$ V sur 100  $\Omega$   $\Leftrightarrow$  100 dB), en réception, la puissance émise varie de 13 à 39 dBm.

### **4.7.2 Le module SIM**

Il s'agit en fait d'une carte à puce qui comporte les éléments suivants :

- un **IMSI** (International Mobile Subscriber Identity) qui est un identifiant universel de l'abonné et qui comporte les informations suivantes.
  - le pays
  - le réseau d'origine
  - la référence des données de l'abonné dans son HLR d'origine
  - *L'utilisation de l'IMSI est limitée autant que possible, une identité temporaire **TMSI** est utilisée dès que possible.*
- Une clé d'authentification **Ki**
- Des algorithmes d'authentification (A3/A8) utilisant la clé Ki.
- Des algorithmes de chiffrement de trames (A5) utilisant la clé **Ki**, et une clé **Kc** calculée après authentification de l'abonné.

## 5. Constellation de satellites

### 5.1 Quelques rappels de mécanique stellaire

L'attraction est la force qui se produit entre deux masses

$$f = K M m / r^2, K = 6.67 \cdot 10^{-11}, M = 5.99 \cdot 10^{24} \text{ (masse de la terre), } R = 6370 \text{ km}$$

En particulier la gravité  $g$  au niveau du sol s'écrit  $g = K M / R^2 = 9.8 \text{ Newtons}$ .

Un satellite en orbite autour de la terre décrit une ellipse, dont la longueur du grand axe est **2a** et celle du petit axe **2b**. La terre est située sensiblement sur un foyer de cette ellipse, le **périgée** de l'orbite est le point le plus proche de la terre, l'**apogée** est le point le plus éloigné.

L'équation de l'orbite, en coordonnées polaires par rapport à un foyer O, s'écrit

$$r(\theta) = m C^2 / k / (1 + \cos(\theta + \alpha)), k = K M m, C = r^2 d\theta/dt = \text{constante}$$

Si  $\alpha=0$ , le point  $\theta=0$  correspond au périgée de l'orbite.

### Quelques lois

- **Loi des aires**, des surfaces égales sont balayées en des temps égaux,  $r^2 d\theta/dt = \text{constante}$ .
- **Loi de Kepler**, le temps de révolution  $T$  est égal à  $T = 2 \pi \sqrt{a^3 / K M}$ , le carré du temps de révolution est proportionnel au cube du grand axe. (**attention**,  $a = R + \text{altitude}$ ,  $R=6370 \text{ km}$ , par exemple  $a=36000\text{km} + 6370 \text{ km}$ ,  $T= 24\text{h}$ ).
- **L'énergie** ne dépend que du grand axe de l'orbite,  $W = K M m / 2a$ .
- **La surface terrestre couverte** (vue) par un satellite dont la distance au centre de la terre est  $h$  s'écrit  $0,5 \times (1 - R / h)$ , avec  $R$  le rayon de la terre

### 5.2 Les satellites géostationnaires (GEO - Geosynchronous Earth Orbit)

Ils décrivent une orbite circulaire à 36000 km d'altitude dans le plan de l'équateur, la surface couverte est de 41 %. Trois satellites couvrent 100% du globe.

Il faut 240ms pour parcourir 72000km, d'où un temps de latence important qui est une gêne pour une utilisation téléphonique.

La puissance reçue  $P_r$  pour une puissance émise  $P_e$  varie comme l'inverse du carré de la distance, il est donc nécessaire de mettre en œuvre des émetteurs terrestres de forte puissance.

Les satellites GEO sont donc utilisés comme des relais offrant typiquement 30 à 40 canaux de 48 Mbit/s destinés à des bouquets de services (vidéo, téléphone, radio diffusion ...).

Les bandes utilisées sont

- la bande C, 2.3 à 7 Ghz (téléphonie fixe, radiodiffusion)
- la bande Ku, 10.7 à 18.1 Ghz (télévision, visioconférence, transfert de fichiers)
- la bande Ka, 18.1 à 31 Ghz (haut débit pour liaison stellaire)

Les principaux opérateurs sont

- |  |               |
|--|---------------|
| • Intelsat (412 pays membres)          | 20 satellites |
| • Eutelsat (Europe)                    | 10 satellites |
| • Inmarsat (services pour les navires) | 9 satellites  |

- Orion (privé, téléphonie, visio conférence, internet) 2 satellites.

### 5.3 Les constellations téléphoniques

Ces satellites sont destinés à couvrir des zones reculées ou mal desservies par le réseau GSM terrestre.

Il existe des approches de type MEO (Medium Earth Orbite, c'est à dire vers des altitudes de 10000 km) et des approches de type LEO (Low Earth Orbit, soit des orbites basses autour de 1000 km d'altitude)

A 10000km un satellite couvre 30 % du globe terrestre, contre 7% à 1000 km, le choix LEO ou MEO est donc lié au nombre de satellites à financer.

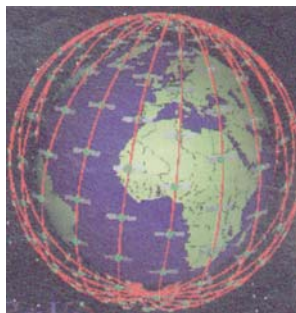
Les bandes utilisées sont 16.10/16.26 Ghz de terre vers satellite et 24.80/25.00 Ghz de satellite vers terre.

- **ICO** (actionnaire principal imarsat - mise en service août 2000), 10+2 satellites à 10355 km et 12 stations terrestres interconnectées par fibre optique. **Coût 4.6 milliard \$.**
- **Iridium** (actionnaire principal Motorola - mise en service septembre 1998), 66 satellites à 780 km d'altitude. 12 à 20 stations terrestres. Une communication interstellaire (entre satellites) permet de réduire le nombre de stations au sol. **Coût 4.7 milliard \$**
- **GlobalStar** (actionnaires principaux loral & alcatel, mise en service début 1999), 48+8 satellites à 1414 km d'altitude. Entre 50 et 100 stations terrestres, l'appel mobile terrestre est transmis via un satellite à la station terrestre la plus proche. **Coût 2.6 milliard \$.**

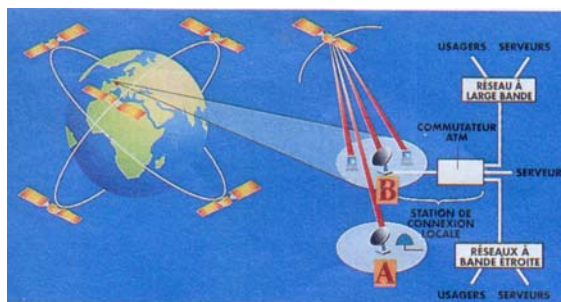
### 5.4 Constellations pour services large bande (projets abandonnés).

Ces constellations ont pour objectif d'offrir un service d'accès **large bande** (2 Mbit/s à 20 ou 64 Mbit/s) en un point quelconque de la planète.

- **Skybridge** (actionnaire principal Alcatel, mise en service 2001), 80 satellites à 1457 km d'altitude. Bande Ku 10/18 Ghz. 4.7 Gbit/s par satellite soit un total de **200 Gbit/s**. Deux sites terrestres sont reliés par un satellite, pas de communication entre satellites. Les débits sont de 2 Mbit/s dans le sens terre/satellite et 20 Mbit/s dans le sens satellite/terre. **Coût 4.2 milliard \$**
- **Teledisc** (actionnaire principal Motorola, partenaires Bill Gates..., mise en service 2003). 288 satellites à 1375 km d'altitude. Bandes Ka 20/30 Ghz. 10 Gbit/s par satellites soit un total de **2.88 Tbit/s**. C'est un véritable réseau stellaire, chaque satellite communique via liaison infrarouge (à 4 Gbit/s) avec les six satellites les plus proches (un devant, un derrière, deux à droite, deux à gauche). Les débits sont de 2 Mbit/s dans le sens terre/satellite et 64 Mbit/s dans le sens satellite vers terre. **Coût 9 milliard \$**



TeleDisc



GlobalStar

## 6. La Couche 1

### 6.1 Introduction

La couche physique transforme un train binaire  $b_k$  en une grandeur physique (signal)  $s(t)$  capable de se propager dans un média et reproduit à l'identique ( $b_k$ ) par une entité analogue (couche physique).

### 6.2 Canal de transmission.

Un canal propage un signal d'entrée  $y(t)$  et délivre un signal de sortie  $Y(t)$ . Classiquement on suppose que le canal se comporte comme un système linéaire, il est caractérisé par sa réponse impulsionnelle  $g(t)$ , dont la convolution par  $y(t)$  fournit la sortie  $Y(t)$ .

$$Y(t) = g(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) y(t-u) du$$

La réponse impulsionnelle peut être représentée également par sa transformée de Laplace  $G(s)$

$$L(g(t)) = G(s) = \int_0^{+\infty} e^{-s t} g(t) dt.$$

avec comme propriété remarquable  $L(g(t)*y(t)) = L(g(t)) \times L(y(t)) = G(s) \times Y(s)$

Enfin la réponse impulsionnelle peut être représentée par sa transformée de Fourier:

$$F(g(t)) = G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-j 2 \pi f t} dt$$

Rappelons quelques propriétés essentielles de la transformée de Fourier, ( \* pour convolution , . pour produit)

$$F(y*g) = F(y) . F(g)$$

$$F(y.g) = F(y) * F(g)$$

$$F(\delta(t)) = 1$$

$$F(1) = \delta(t)$$

$$F(\sum \delta(t-kT)) = 1/T \sum \delta(f-k/T)$$

$$F(e^{j 2 \pi f_0 t}) = \delta(f-f_0)$$

$$F(t-T) = e^{-j 2 \pi T} . F(f)$$

$$F(\text{fonction paire}) = \text{fonction réelle}$$

$$F(\text{fonction impaire}) = \text{fonction imaginaire}$$

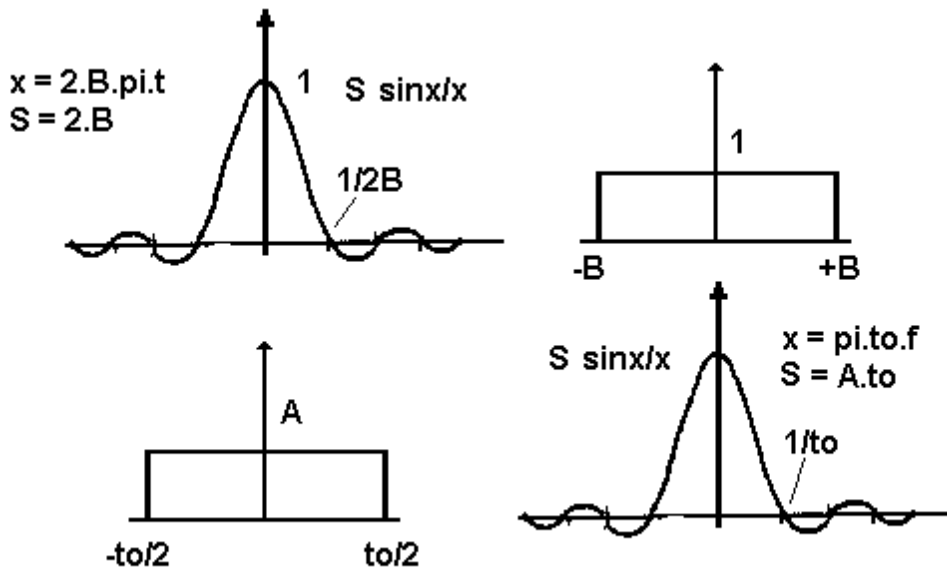
$$F(\text{conjuguée de } f) = (\text{conjuguée } F)(-f)$$

Par exemple la fonction de convolution associée à un canal « transparent » (  $Y(t)=y(t)$  ) est  $\delta(t)$ . La réponse impulsionnelle est également la réponse du canal à un signal  $\delta(t)$ .

Un canal est dit à bande limitée lorsque la transformée de Fourier de sa réponse impulsionnelle est égale à 1 dans un intervalle  $[-B, +B]$  et nulle à l'extérieur.

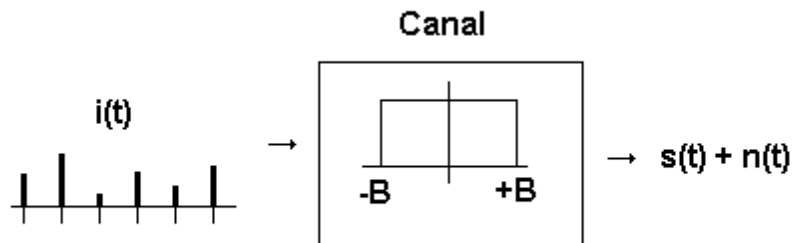
La réponse impulsionnelle s'écrit alors :

$$\sin(\pi t / T_0) / (\pi t / T_0), T_0 = 1/2B, \text{ soit } 1/T_0 = F_0 = 2B$$



Exemple :  $B=4000$  Hz,  $T_0 = 1/8000$  s =  $125 \mu\text{s}$ ,  $1/T_0 = 8000$  Hz.

### 6.2.1 Théorème de Nyquist.



Dans un canal de bande limitée  $B$ , la réponse à un signal

$$y(t) = \sum a_k \delta(t - kT_0)$$

s'écrit donc,

$$Y(t) = \sum a_k \sin(\pi (t - kT_0) / T_0) / (\pi (t - kT_0) / T_0).$$

En remarque en particulier que

$$Y(k.T_0) = a_k = y(k.T_0)$$

On en déduit qu'un canal de bande passante  $B$  est capable de transporter un débit de moments  $(a_k)$  d'information égal à  $2B$ . (**théorème de Nyquist**).

### 6.2.2 Critère de Nyquist élargi

La réponse impulsionnelle d'un système dont la transformée de Fourier est telle que :  
 $F(B/2-f) + F(B/2+f) = F(0) = A.T_m$ ,  $T_m = 1/B$  (symétrie centrale autour de  $B/2$ ).

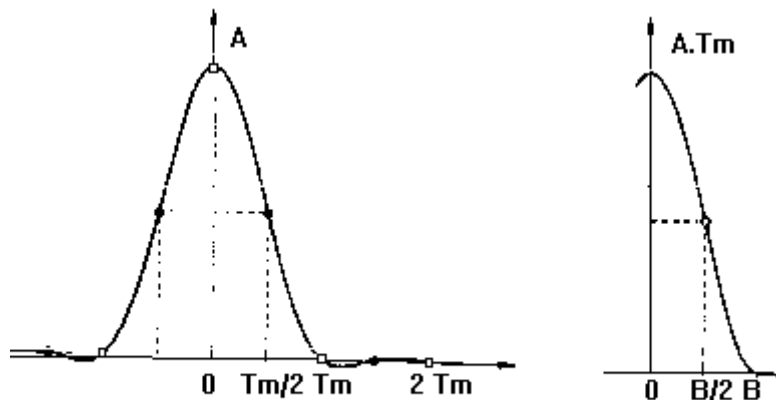
s'annule tous les  $k.T_m$ .

Le débit binaire maximum d'un tel canal est  $B$ .

Exemple : deuxième critère de Nyquist

$$F(f) = A^2 T_m \cos^2(\pi / 2.T_m. f) \text{ pour } |f| < B, 0 \text{ pour } |f| > B \quad (B = 1/T_m)$$

$$g(t) = A \text{sinc}(\pi t / T_m) / (\pi t / T_m) \cos(\pi t / T_m) / [1 - (2 t / T_m)^2]$$



### 6.3 Auto-corrélation et densité spectrale de puissance.

Pour un signal muni de « bonnes » propriétés à savoir :

- **Stationnarité**, les propriétés statistiques (espérance et covariance) sont indépendantes de l'origine des temps choisie, et sont liées uniquement à la durée de l'observation.
- **Ergodicité**, la moyenne temporelle admet une limite (la moyenne statistique).

On définit la fonction d'auto-corrélation

$$\varphi_{xx}(u) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^*(t) x(t+u) dt$$

$\varphi_{xx}(0)$  représente la puissance du signal.

La densité spectrale de puissance ( $W_{ss}$ ) est la transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation, elle représente la répartition de l'énergie d'un signal dans le domaine fréquentiel. Un signal dont la puissance est uniformément répartie en fréquence ( $W_{ss} = \text{constante}$ ) possède une fonction d'auto-corrélation égale à  $W_0. \delta(t)$ .

Exemple:  $x(t) = A e^{j 2 \pi f_0 t}$

$$\int_{-T}^T x^*(t) x(t+u) dt = \int_{-T}^T A e^{-j 2 \pi f_0 t} \cdot A e^{j 2 \pi f_0 (t+u)} dt = A^2 \cdot 2T e^{j 2 \pi f_0 u}$$

$$\varphi_{xx}(u) = A^2 e^{j 2 \pi f_0 u}$$

$$W_{ss}(f) = A^2 \delta(f-f_0)$$

Dans un système linéaire la fonction d'auto-corrélation de la sortie  $\varphi_{YY}$  est égale à la convolution de la fonction d'auto-corrélation d'entrée  $\varphi_{yy}$  par la réponse impulsionnelle  $g$ .

$$\varphi_{YY} = g * \varphi_{yy}$$

#### 6.4 Notion de bruit gaussien blanc.

Un bruit blanc est un signal stationnaire et ergodique qui possède une fonction de corrélation égale à  $P_n \cdot \delta(t)$  et donc une densité spectrale de bruit constante.

De surcroît un bruit gaussien  $x(t)$  est muni d'une fonction de distribution gaussienne, c'est à dire :

$$p(x_0 < x < x_0 + dx) = 1/\sqrt{(2\pi)\sigma^2} \cdot \exp(-x^2/2\sigma^2) dx, \sigma^2 \text{ (la variance) représente la puissance du signal } (\sigma^2 = P_n).$$

#### 6.5 Capacité d'un canal.

Un canal est donc caractérisé par le débit  $M$  maximal de moments d'informations qu'il peut produire. Un moment d'information possède  $m$  valeur distinctes. Un phénomène physique, **le bruit**, limite le nombre de moments d'informations

Le débit binaire du canal est donc  $D = M \cdot \log_2 m$  (puisque que  $\log_2 m$  bits codent  $m$  moments d'information).

Soit  $s(t)+n(t)$  le signal qui résulte de la superposition du signal d'information  $s(t)$  et du bruit  $n(t)$ .

Shannon a montré en 1948 que la limite théorique pour  $m$  dans le cas d'un bruit blanc gaussien est

$$M_{\max} = (1 + P_s/P_n)^{1/2}$$

La capacité maximale du canal s'écrit donc

$$C_{\max} = 2B \log_2 (1 + P_s/P_n)^{1/2} = \mathbf{B \log_2 (1 + P_s/P_n)} \text{ (en bits/s)}$$

#### 6.6 Taux d'erreur binaire

La probabilité d'une erreur s'écrit :

$$p(\text{erreur}) = p(\text{recevoir 0 et 1 émis}) + p(\text{recevoir 1 et 0 émis}) = p(0/1) \cdot p(1) + p(1/0) \cdot p(0)$$

$p(0/1) = p(\text{recevoir } 0 \text{ si } 1 \text{ émis}).$   
 $p(1/0) = p(\text{recevoir } 1 \text{ si } 0 \text{ émis}).$   
 $p(0) = p(\text{émission } 0) = 1/2$   
 $p(1) = p(\text{émission } 1) = 1/2$

Soit pour un signal  $s(t)$  tel que  $0 \rightarrow 0, 1 \rightarrow A$ , avec un bruit gaussien  $n(t)$  d'écart type  $\sigma$

$$p(1/0) = p(e(t) > A/2) = 1/\sqrt{(2\pi)\sigma} \cdot \int_{A/2}^{\infty} \exp(-x^2/2\sigma^2) dx = \text{erfc}(A/2\sigma)$$

de même

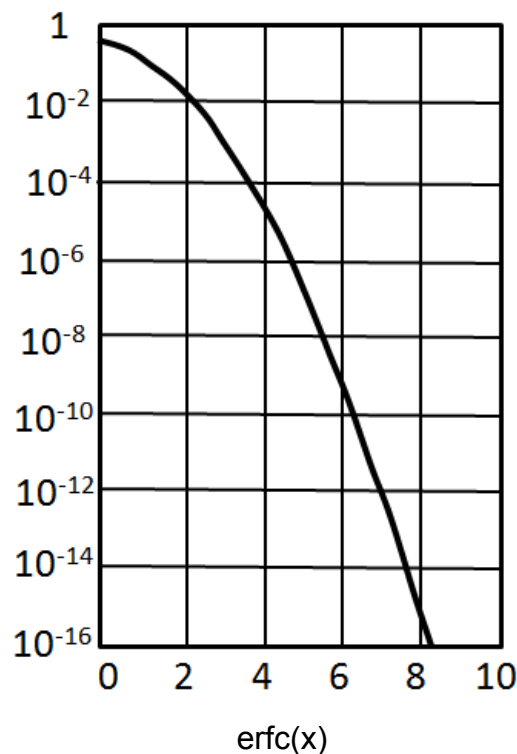
$$p(0/1) = p(e(t) < -A/2) = \text{erfc}(A/2\sigma)$$

$$\text{erfc}(x) = 1/\sqrt{(2\pi)\sigma} \cdot \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2\sigma^2) dt$$

$$p(\text{erreur}) = \text{erfc}(A/2\sigma) = \text{erfc}(1/2 \sqrt{A^2} / \sqrt{\sigma^2}) = \text{erfc}(1/2 \sqrt{P_s/P_n})$$

On constate un taux d'erreur de l'ordre de  $10^{-9}$  pour  $A/\sigma$  égal à 12 ( $20 \log 12 \approx 22$  dB)  
 Remarque : le rapport signal à bruit s'exprime généralement en décibel (dB) et est défini par :

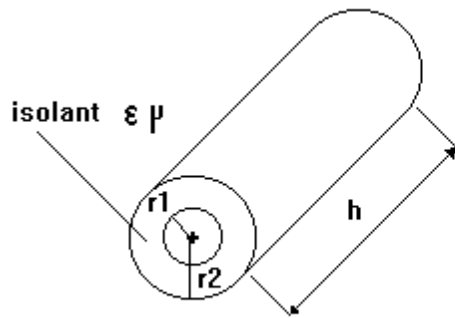
$$S/B = 10 \log (P_s/P_n).$$



### 6.7 Cable Coaxial - guide d'ondes

Un câble coaxial est composé de deux cylindres métalliques séparés par un isolant (diélectrique).

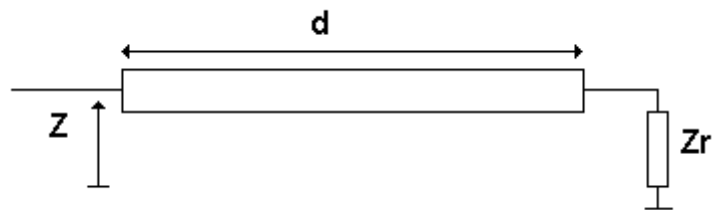




$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot h}{\ln r2/r1}$$

$$L = \mu \frac{\ln r2/r1}{h \cdot 2 \cdot \pi}$$

On introduit la notion **d'impédance caractéristique** du câble  $Z_c$ . On démontre que  $Z_c = \sqrt{L/C}$ , la vitesse de propagation de l'onde électrique dans l'isolant est  $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$  =  $1/\sqrt{LC}$ .



Lorsque la ligne est terminée par une impédance de charge  $Z_r$ , l'entrée de la ligne voit une impédance :

$$Z = Z_c \cdot (Z_r + j Z_c \cdot \text{tg}(\beta d)) / (Z_c + j Z_r \text{tg}(\beta d)):$$

Avec  $\beta = \omega\sqrt{LC} = \omega/v = 2 \cdot \pi f / v = 2 \cdot \pi / vT = 2 \cdot \pi / \lambda$ ,  $\lambda$  représente la longueur d'onde, c'est à dire la distance parcourue durant une période  $T$  ( $T=1/f$ )

*Remarque 1* :  $Z=Z_c$  pour  $Z_r=Z_c$ .

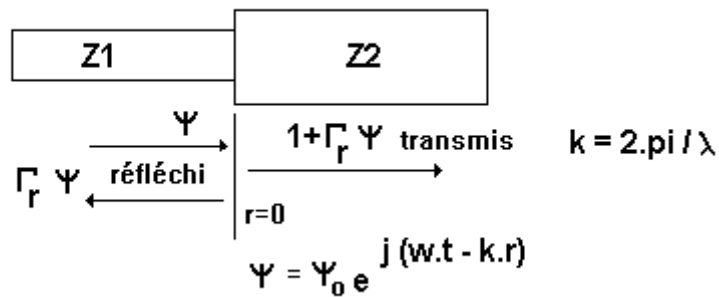
*Remarque 2* :  $d = \lambda/4$  (ligne quart d'onde)  $Z= Z_c^2 / Z_r$  (soit  $Z=0$  - circuit fermé pour  $Z_r=+\infty$ , et  $Z=+\infty$  - circuit ouvert pour  $Z_r = 0$ )

*Remarque 3* :  $d = \lambda/2$ ,  $Z=Z_r$ .

Dans une ligne le coefficient de réflexion à l'extrémité de la ligne est  $\Gamma_r = (Z_r - Z_c)/(Z_r + Z_c)$ , ce qui signifie que la charge absorbe la fraction  $1+\Gamma_r$  du signal et réfléchit une fraction  $\Gamma_r$ .

De manière plus générale le coefficient de réflexion à la jonction de deux lignes d'impédances caractéristique différentes, s'écrit :

$$\Gamma_r = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1).$$

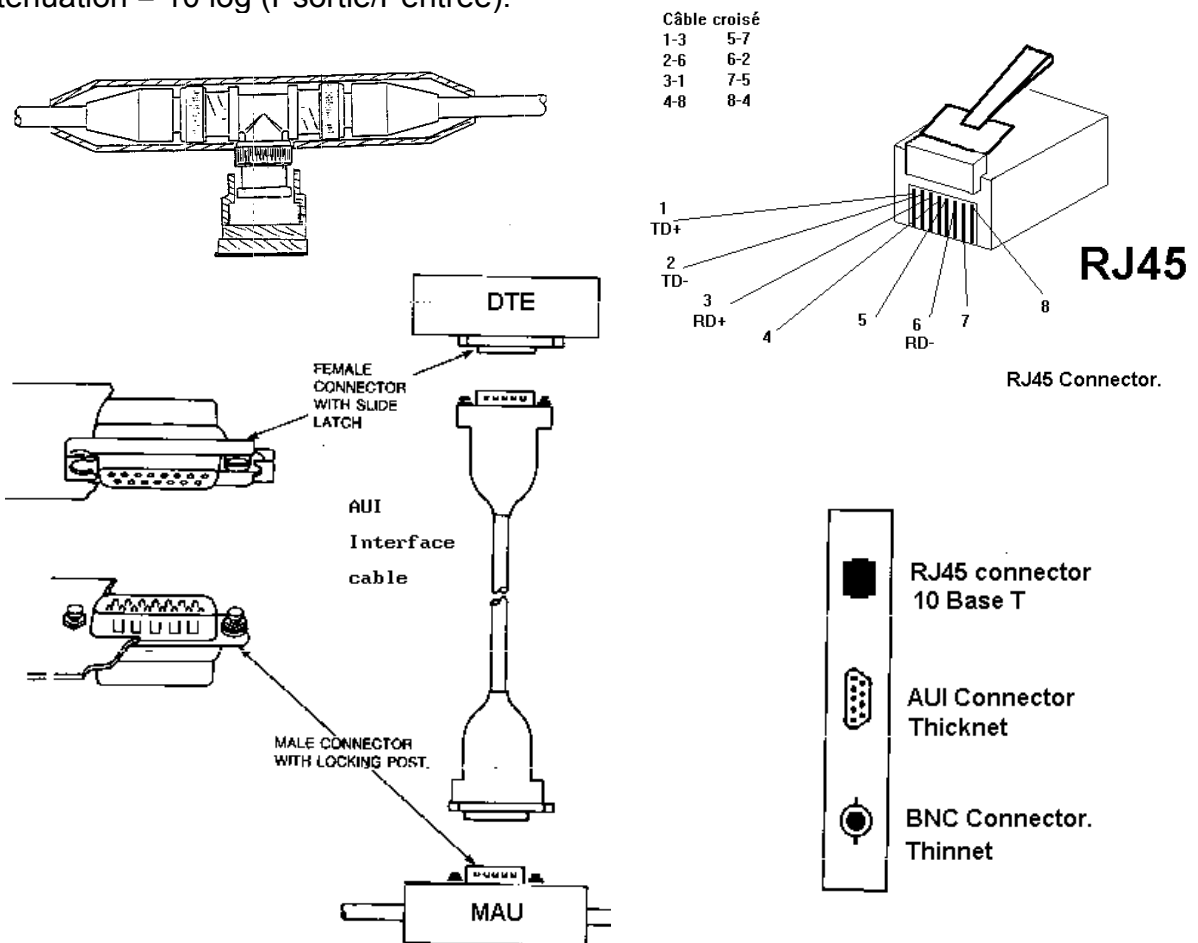


### 6.7.1 Le câble d'Ethernet

L'impédance caractéristique est de 50 ohms (+- 2ohms), la vitesse de l'onde électrique doit être supérieure à 0.65c, l'atténuation pour 185 m (600ft) doit être inférieure à 8.5 dB pour une fréquence de 10 Mhz.

N.B : l'**atténuation** représente le rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée, exprimée en décibel (dB).

Atténuation = 10 log (Psortie/Pentrée).

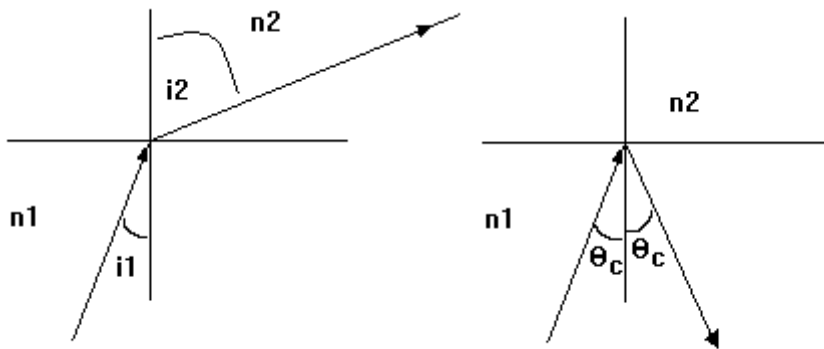


### 6.8 Fibre optique.

On caractérise un milieu par son indice de réfraction  $n$  ( $n = c/v = \sqrt{\epsilon_{\text{milieu}} / \epsilon_{\text{vide}}}$  -  $c$  vitesse de la lumière dans le vide -  $v$  vitesse de la lumière dans le matériau - exemple  $n = \sqrt{11.8} = 3.5$  pour le silicium). A l'interface entre deux milieux d'indice  $n_1$  et  $n_2$  l'onde change de direction :

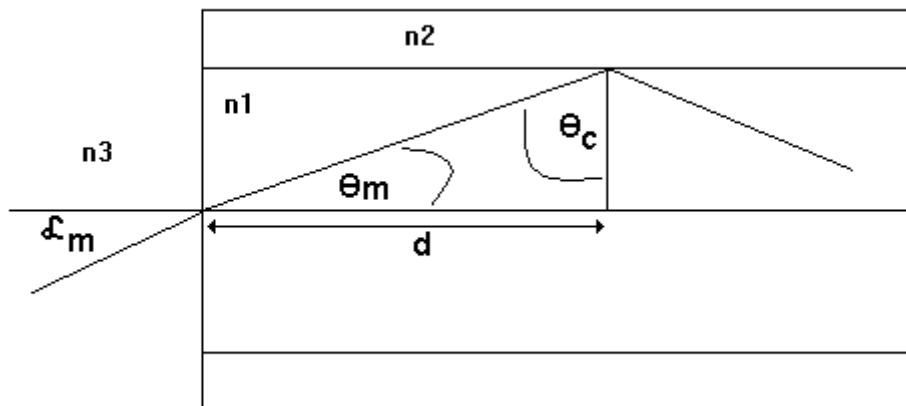
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (\text{on suppose } n_1 > n_2)$$

si  $n_1/n_2 \cdot \sin i_1 > 1$ , cette équation n'est plus vérifiée, pour  $\sin(\theta_c) = n_2/n_1$  une réflexion totale se produit.



#### 6.8.1 Fibre à saut d'indice.

Une fibre optique à saut d'indices est constituée par deux cylindres d'indice  $n_1$  (le coeur) et  $n_2$  (la gaine) différents ( $n_1 > n_2$ ). L'onde lumineuse provient d'un milieu  $n_3$ , l'air en général ( $n_3=1$ ).



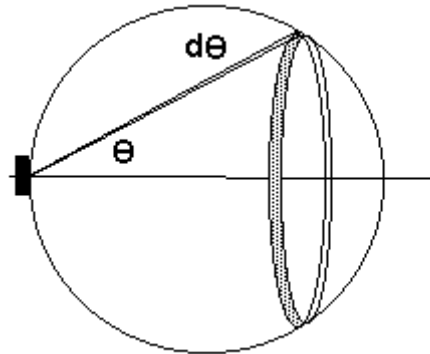
A l'intérieur de la fibre le guidage de la lumière s'effectue par réflexion totale (entre les milieux  $n_1$  et  $n_2$ ), c'est à dire pour des rayons dont l'angle d'incidence est supérieur à  $\theta_c$ .

Un rayon d'incidence  $\alpha$  issue du milieu 3 franchit l'interface 1/3 avec une incidence de sortie  $\sin \alpha = n_1 \sin \theta$ , on en déduit la valeur maximale de  $\alpha$

$$\sin \alpha_m = n_1 \sin \theta_m = n_1 \cos (\theta_c) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c}$$

$\sin \alpha_m = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = \sqrt{(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)} = \text{ON}$  (**Ouverture Numérique**) = NA (**Numerical Aperture**).

### 6.8.2 Injection.



Une source lambertienne émet une puissance  $I(\theta)$  dans un angle solide  $d\Omega$  ( $d\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \sin \theta \, d\theta$ ) telle que :

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta$$

$$\text{La puissance totale émise est : } P_{\text{tot}} = \int_0^{\pi/2} I(\theta) d\Omega = \pi \cdot I_0$$

Seuls les rayons d'angle d'incidence inférieur à  $\alpha_m$  seront injectés dans la fibre, soit

$$P_{\text{inj}} = \int_0^{\alpha_m} I(\theta) \, d\Omega = P_{\text{tot}} \text{ON}^2$$

### 6.8.3 Notion de dispersion.

Un rayon qui traverse la fibre dans l'axe, parcourt une distance  $d$  en un temps

$$t_{\text{axe}} = d / v = d \cdot n_1 / c$$

Le rayon le plus oblique parcourt la même distance axiale en

$$t = d / \cos \theta_m \cdot n_1 / c = n_1^2 \, d / n_2 \cdot c$$

L'intervalle de temps qui sépare l'arrivée de deux rayons s'écrit donc :

$$\Delta T = n_1/n_2 \cdot d/c \cdot (n_1 - n_2).$$

$$\Delta T/d = n_1/n_2 \cdot (n_1 - n_2)/c$$

soit

$$\Delta T/d = (n_1 - n_2)/c \text{ lorsque } n_1 - n_2 \text{ est proche de } 0.$$

Par exemple avec  $n_1 + n_2 = 3$ ,  $n_1 - n_2 = 0.01$  on obtient les valeurs suivantes:

$$\text{ON} = \sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)} = \sqrt{0.03} = 0.173$$

$$P_{\text{inj}} = P_{\text{tot}} \cdot 0.03 \text{ (10 log 0.03 = -15.2 dB - perte d'insertion).}$$

$$\Delta T/d = 34 \text{ ns / km}$$

On peut approximer la bande passante par kilomètre par :

$$B \# 1/\Delta T = 29 \text{ Mhz / Km.}$$

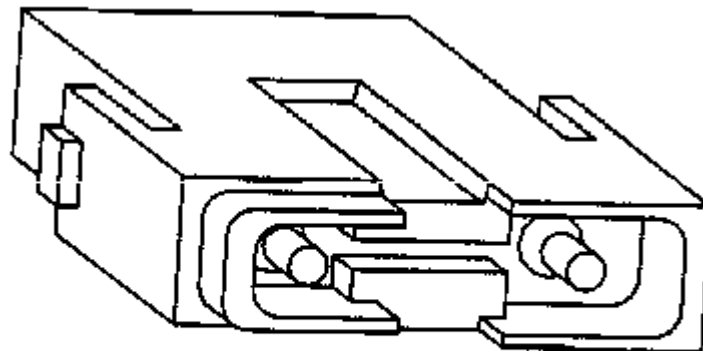
N.B: Il existe également des fibres à gradient d'indice (variation continue de l'indice du coeur de  $n_1$  à  $n_2$ ).

#### 6.8.4 Fibre multimode.et monomode.

La fibre **multimode** (diamètre de coeur important de l'ordre de  $50 \mu\text{m}$  ) permet la propagation d'une source incohérente (telle que lambertienne par exemple). Lorsque le diamètre du coeur devient petit (de l'ordre de  $5 \mu\text{m}$ ) seul un émetteur cohérent (laser) peut injecter de la puissance dans la fibre qui est dite **monomode**.

#### 6.8.5 Caractéristique de la fibre FDDI.

Diamètre de coeur	62.5 $\mu\text{m}$
Diamètre de gaine	125 $\mu\text{m}$
ON	0.275
Bande Passante	500 Mhz/km minimum.
Atténuation	11 dB / km maximum.
Longueur d'onde	1300 nm
Puissance injectée par un émetteur:	entre -20 et -14 dBm
Puissance admise par un récepteur	entre -31 et -14 dBm
Taux d'erreur du récepteur	inférieur à $10^{-9}$
N.B dBm = $10 \log ( P(\text{mW}) / 1\text{mW} )$	



FDDI MIC Connector.

#### 6.9 Transmission en bande de base

On définit la transmission en bande de base par le fait que le signal ne subisse aucune translation en fréquence (voir le multiplexage fréquentiel).

Le signal d'information est un flux binaire ( $b_k$ , suite de un et de zéro) cadencé à la fréquence d'horloge  $T_0$ . Le codage consiste à associer à chaque bit un signal physique ( $a_k$ ) que l'on adapte le mieux possible au média qui va le propager.

##### 6.9.1 Codage NRZ - Non Return To Zero

Le bit 1 est associé à la valeur  $+a$ , le bit 0 est associé à la valeur  $-a$ . On montre que la fonction d'auto-corrélation est :

$$\phi_{xx}(u) = (1 - |u| / T_0) a^2$$

Soit une densité spectrale  $F(\phi_{xx})(f) = a^2 T_0 (\sin \alpha / \alpha)^2$ ,  $\alpha = \pi T_0 f$

Eléments de démonstration

$$u = j \times T_0 + u_0, 0 \leq u_0 \leq T_0, j \geq 0$$

$$\int_{kT_0}^{(k+1)T_0} x(t)x(t+u) dt = \int_{kT_0}^{kT_0+(T_0-u_0)} x(t) x(t+u) dt + \int_{kT_0+(T_0-u_0)}^{(k+1)T_0} x(t) x(t+u) dt$$

$$= x_k x_{k+j} (T_0 - u_0) + x_k x_{k+j+1} u_0$$

$$\varphi_{xx}(u) = \lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{1}{kT_0} (T_0 - u_0) \sum_{k \geq 0} x_k x_{k+j} + u_0 \sum_{k \geq 0} x_k x_{k+j+1}$$

### 6.9.2 Code RZ unipolaire (Return To Zero)

Le bit 1 est associé à la valeur +a durant  $T_0/2$  puis 0 durant  $T_0/2$ , le bit 0 est associé à la valeur 0.

### 6.9.3 Code bi-phase (ou Manchester).

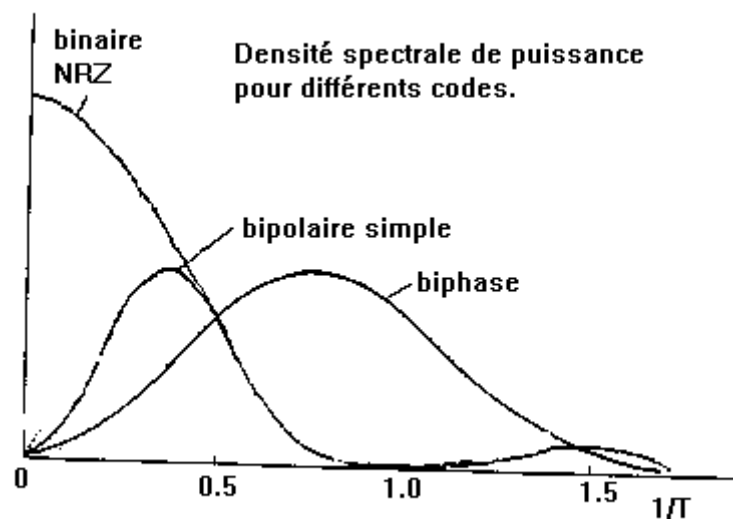
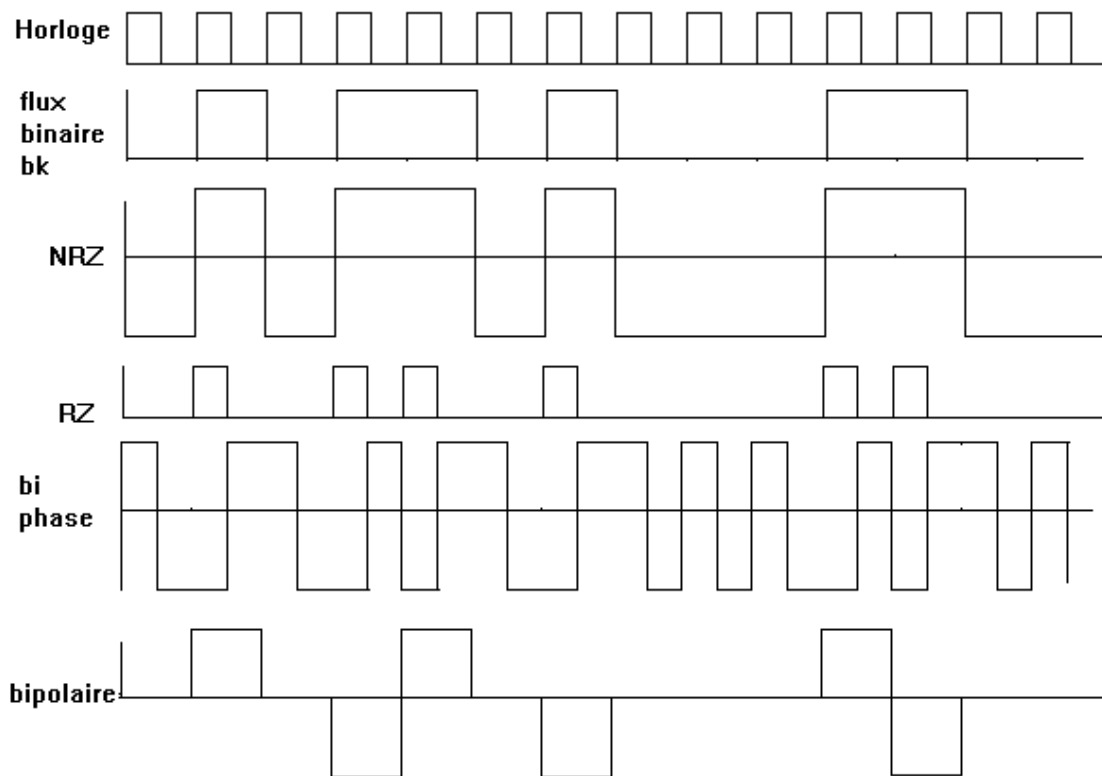
L'intervalle de temps  $T_0$  est découpé en deux parties égales, dans le premier intervalle on transmet  $v$  et dans le suivant  $-v$ . Pour le bit 1  $v=+a$ , pour le bit 0  $v=-a$ . C'est le code utilisé dans le réseau Ethernet

### 6.9.4 Code bi polaire (AMI alternate mark inversion NRZ )

Le bit 1 est associé en alternance à +a ou -a. Le bit 0 est associé à la valeur 0.

### 6.9.5 Code NRZI

Non return to zero, inverted on ones, le bit 0 est associé à la valeur 0, le bit 1 est associé en alternance à +a ou 0. C'est la technique d'encodage utilisée par FDDI.



### 6.10 Multiplexage fréquentiel

Cette technique consiste à décaler le spectre du signal transmis dans une bande de fréquence différente. Soit  $X(f)$  le spectre d'un signal  $x(t)$ , après multiplication par une fonction  $\cos(2.\pi.f_0.t)$  on obtient le spectre :

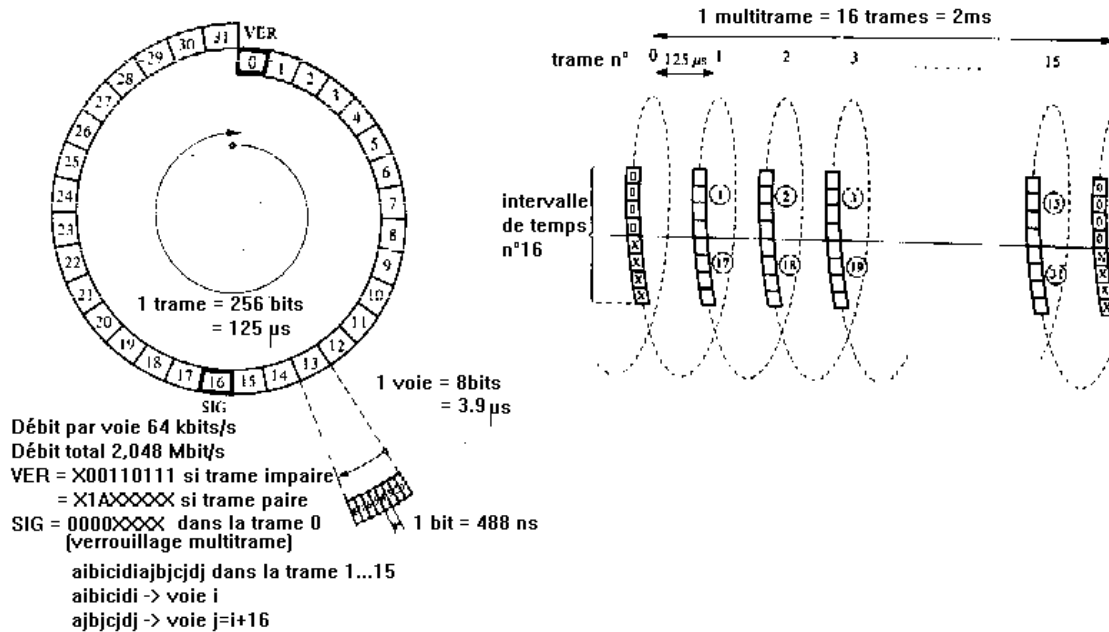
$$\frac{1}{2} X(f-f_0) + \frac{1}{2} X(f+f_0).$$

Le démultiplexage s'obtient en multipliant le signal reçu par la fonction  $\cos(2.\pi.f_0.t)$ , on obtient le spectre :

$$\frac{1}{4} X(f-2.f_0) + \frac{1}{2} X(f) + \frac{1}{4} X(f+2.f_0)$$

## 6.11 Multiplexage temporel

Le flux binaire est découpé en mot binaires (8 bits par exemple). Les mots en provenance de différentes sources sont transmis tour à tour, durant des intervalles de temps constants sur un canal de transmission unique. L'ensemble de ces différents **voies** constitue une **trame** temporelle. Le **verrouillage** de trame consiste à établir à identifier le début d'une trame, la **signalisation** a pour objet le transport d'informations auxiliaires (de centraux à centraux téléphonique). La figure qui suit décrit une trame MIC, utilisée entre centraux téléphonique.



## 6.12 Commutation de circuits et de paquets.

Dans la commutation par **circuits** le chemin emprunté par l'information est déterminé au début de l'appel, les autocommutateurs téléphoniques relient les voies utilisées dans les trames (**circuit virtuel**). Dans la commutation par **paquets** le chemin est établi au moment du passage de chaque paquet d'information.

## 6.13 Modulation

### 6.13.1 Modulation d'amplitude.

$$a(t) = b(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t).$$

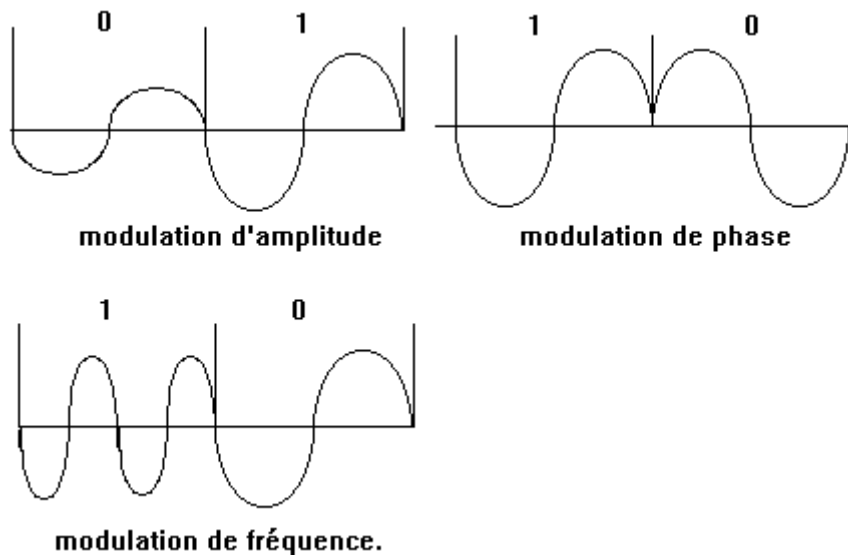
### 6.13.2 Modulation de fréquence

$$a(t) = b(t) \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{(b(t))})$$

### 6.13.3 Modulation de phase

$$a(t) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \varphi_{(b(t))})$$





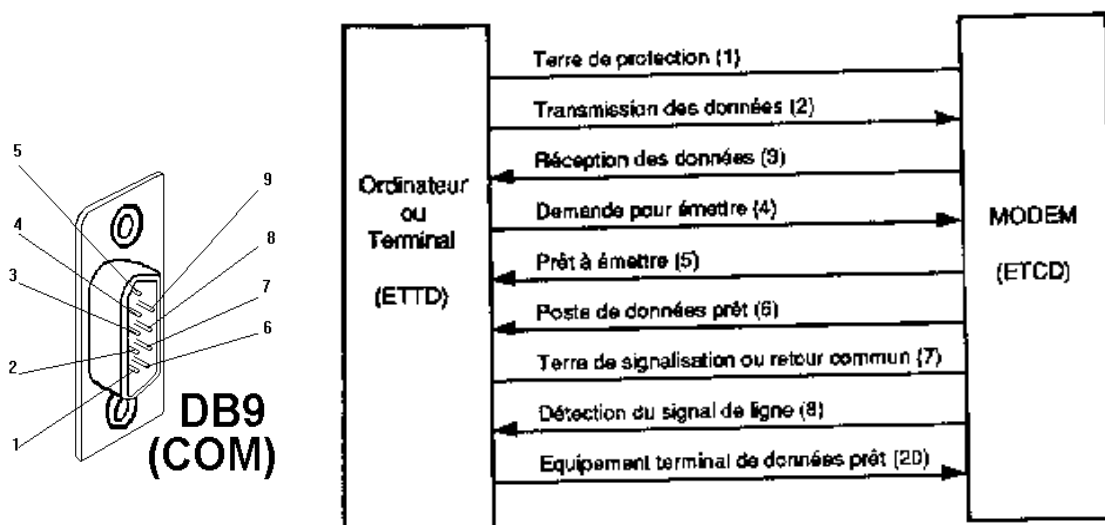
### 6.14 Les modems.

Les modems (MODuler-DEModulateur) sont des équipements capables d'effectuer l'émission et la réception de données numériques sur lignes téléphoniques ou sur des liaisons spécialisées. Le CCITT standardise plusieurs types de modems dans les recommandations V21, V22, V23, V26bis, V27ter, V29, V32, V32bis. Les principales modulations utilisées sont la modulation de fréquence et la modulation de phase.

Les liaisons peuvent être **half-duplex** (un sens alterné) ou **full duplex** (deux sens simultanés). En mode **synchrone** le récepteur se synchronise en reconstituant l'horloge de l'émetteur. En mode **asynchrone** le récepteur se synchronise par reconnaissance des signaux de départ (START) et d'arrêt (STOP).

### 6.15 La Jonction V.24 et le standard RS232C.

La recommandation V.24 du CCITT, proche de la norme RS232C (de l'Electronic Industries Association) décrit la jonction (interface électrique) entre un ordinateur (ETTD) et un modem (ETCD). Le tableau qui suit précise les principaux signaux définis, ainsi que le mode de réalisation d'un câble dit « nul modem » qui permet de relier directement deux ETTDs



Broche Port COM PC	Nom du signal V.24	Nom RS232-C	Code V.24	Relié à broche # pour câble nul modem
1	Détection signal de ligne DS	Data Carrier Detect D	109	6
2	Réception de données RD	Received Data RD	104	3
3	Emission de données ED	Transmitted Data TD	103	2
4	Terminal de données prêt TDP	Data Terminal Ready DTR	108	6
5	Terre de signalisation TS	Signal Ground SG	102	5
6	Poste de données prêt PDP	Data Set Ready DSR	107	4
7	Demande pour émettre DPE	Request To Send RTS	105	8
8	Prêt à émettre PAE	Clear To Send CTS	106	7
9	Indicateur d'appel IA	Ring Indicator R	125	non relié.

### 6.15.1 Exemple de mode asynchrone, la liaison série RS232-C

Les bits sont transmis par mot de 7 ou 8 bits. La trame comporte un bit **START**, le mot binaire à transmettre, un bit de **parité** éventuel, et un ou deux bits **STOP**.

bit start	mot d'information	bit de parité	bit(s) stop
1 0	0 0 1 0 1 1 1 0	(1/0)	1 (1)

Le bit de parité compte le nombre de 1 du mot d'information,

- parité **paire**, le bit de parité est à 1 si le nombre de 1 du mot d'information est impair (->0 dans notre exemple)

- parité **impaire**, le bit de parité est à 1 si le nombre de 1 du mot d'information est pair (->1 dans notre exemple)

### 6.15.2 Exemple de mode synchrone, le BISYNC.

Le **Bisynchronous Transmission** est un protocole d'origine IBM destiné à la transmission de données synchrones entre deux équipements. En voici le format de trame:

SYN	SYN	SOH	En-tête	STX	Données	ETB ou ETX	Contrôle d'erreur
-----	-----	-----	---------	-----	---------	---------------	----------------------

**SYN** = SYNchronize  
**SOH** = Start of Header  
**STX** = Start of TeXt  
**ETB** = End of Transmission Block  
**ETX** = End of Text

## 6.16 Détection correction des erreurs.

### 6.16.1 Bit de parité.

Cette technique permet de détecter certaines erreurs de transmissions.

### 6.16.2 Codes auto correcteurs

#### 6.16.2.1 Distance de hamming.

La distance de Hamming (d) entre deux mots binaires est égal au nombre de bits de rang identique qui sont différents.

Exemple:  $d((0\ 1\ 1), (1,0,1)) = 2$

La probabilité qu'un mot X ait été émis sachant que l'on a reçu le mot Y s'écrit :

$$p(X/Y) = p^{d(X,Y)} \cdot (1-p)^{n-d(X,Y)}$$

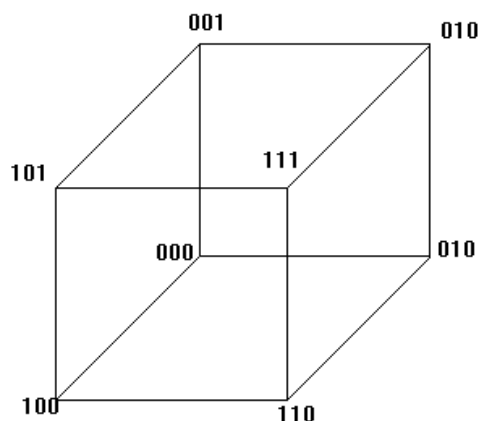
n = le nombre de bit d'un mot, p probabilité d'une erreur.

d = distance de Hamming.

Cette probabilité est d'autant plus faible que la distance de Hamming entre les deux mots est grande. Lorsqu'un mot de code illicite est reçu on choisit un mot de code existant dont la distance à l'erreur est la plus petite.

#### Exemple

Soit des mots de 3 bits. On choisit deux mots de code 0->000 1->et 111. Les mots reçus avec deux 0 seront corrigés en 000 (0). Les mots reçus avec deux 1 seront corrigés en 111 (1)



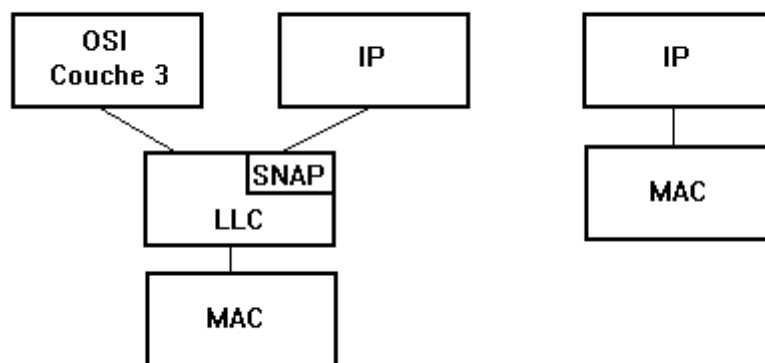
## 7. La couche liaison de données.

### 7.1 Introduction.

La couche liaison de données transforme en trames MAC les PDU (ou encore paquets) issus de la couche réseau. Nous avons vus au chapitre précédent que la sous couche MAC assure également un service de contrôle d'erreur. La couche 2 fournit des services additionnels de contrôle de flux et offre de multiples SAP qui peuvent être interprétés comme l'adresse (prise) de services multiples accessible à depuis une adresse MAC unique.

La sous couche LLC (Logical Link Control) du modèle OSI décrit les méthodes d'échanges de données associées à cette couche, historiquement elle est basée sur le protocole HDLC (ISO), repris par le CCITT dans la norme X25.

Le protocole internet ne comporte pas ce sous ensemble, néanmoins l'encapsulation d'un paquet IP à travers une sous couche LLC est rendue possible par un SubNetwork Access Protocol ( **SNAP** ) particulier.



### 7.2 Gestion de transmission de données.

La couche 2 gère le flux de trames émises au moyen de différents protocoles que nous classerons en trois types.

#### 7.2.1 Protocole sans acquittement.

C'est un protocole trivial, utilisé de manière implicite dans le cadre de la suite des protocoles internet. Aucun acquittement n'est renvoyé par le destinataire de l'information. Le protocole **LLC type 1** décrit une telle fonctionnalité. La perte de trame est tolérée dans des systèmes munis d'une couche transport qui permet également de détecter l'information (*les PDU*) perdue et de récupérer ces erreurs au moyen de retransmissions. Enfin lorsque le taux d'erreur du milieu physique est faible, la perte de trame est d'autant plus tolérable que sa probabilité est faible.

**Exemple:** FDDI - BER (Bir Error Rate)  $10^{-12}$  - débit  $1.25 \cdot 10^8$  bits/s - 1 erreur bit toutes les 8000 secondes.

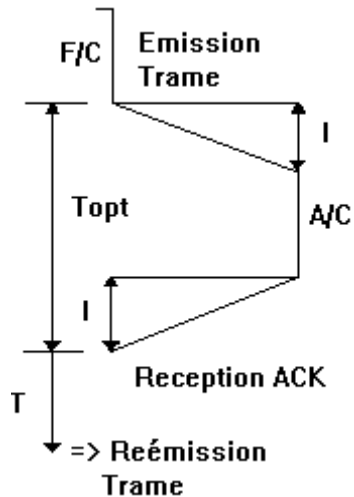
Soit  $p$  la probabilité pour qu'un bit appartienne à une trame de donnée.

$p \sim$  taux d'utilisation de l'anneau (0 - 100 %).

Probabilité de perte de trame =  $p \cdot \text{BER}$ .

## 7.2.2 Protocole «Stop and Wait»

Une seule trame est émise à la fois. L'émetteur arme un chien de garde (**watchdog**) et attend la réception d'un accusé de réception (**acknowledgment ACK**). Si le récepteur détecte une erreur il répond par un **NAK** (accusé de réception négatif). L'émetteur retransmet l'information lorsque le chien de garde expire ou lors de la réception d'un **NAK**.



Soit C la capacité du canal (bits/s), I le temps de propagation entre émetteur et récepteur, F la longueur d'une trame de donnée (bits), A la longueur d'une trame d'acquiescement (bits).

- l'acquiescement est reçu au bout de  $2I$  secondes
- le taux d'utilisation maximal du canal est

$$Tocup_{nom} = F / (F + A + 2.I.C)$$

Si la trame de donnée ou l'acquiescement est perdu l'émetteur attendra T secondes avant de procéder à une nouvelle émission.. L'échec d'une transmission coûte donc  $F+CT$  bits de canal

Soit R le nombre moyen de retransmissions, la capacité du canal (en bits) consommée pour R échecs et un succès s'écrit:

$$R (F+CT) + (F + A + 2.C.I)$$

Soit P1 la probabilité de perte d'une trame de données, P2 la probabilité de perte d'une trame d'acquiescement. La probabilité d'un échec est

$$L = 1-(1-P1)(1-P2) \sim P1 + P2$$

et donc la probabilité de k tentatives s'écrit (k-1 échecs, 1 réussite)  $(1-L).L^{k-1}$ ,

d'où l'on déduit le nombre moyen R de tentatives par trames

$$R = \sum k (1-L).L^{k-1} = (1-L) . \sum k L^{k-1} = (1-L) / (1-L)^2 = R = 1/(1-L).$$

$$\sum k x^{k-1} = 1/(1-x)^2$$

En tenant compte des erreurs physiques, le taux d'occupation du canal est donc

$$Tocup = F / (R (F+CT) + (F+A+2CI))$$

$$R = 1/(1-L)$$

### Remarques

- La valeur de T optimal est  $2.I + A/C$ , soit  $2.I$  si  $2.I \gg A/C$

- Si E le taux d'erreur, on peut admettre que

Soit lg la longueur en bits d'une trame,  $P_{non\_erreur} = (1-E)^{lg}$  et donc

$$(1-P1) = (1-E)^F, (1-P2) = (1-E)^A$$

- pour  $T=2.l$ ,  $E$  petit,  $F \gg A$  on obtient.

$L \neq P1$ ,  $R \neq P1$

$$\text{Tocup} = (1-P1).F/(F+CT) = (1-L) T_{\text{nom}}$$

### 7.2.3 Protocole avec fenêtre d'anticipation (ou encore fenêtre glissante)

Lorsque les deux extrémités d'une liaison sont sources de trames (full duplex) l'acquittement d'une trame préalablement reçue peut être inséré dans une trame de donnée, cette technique porte le nom de **piggybacking**.

Les protocoles à fenêtre d'anticipation affectent à chaque trame émise un **numéro de séquence**.

- La fenêtre d'émission est la liste des numéros de trames qui peuvent être émises.
- De même la fenêtre de réception est la liste des numéros de trames qui peuvent être reçues.
- La largeur d'une fenêtre  $N$  est le nombre maximum d'éléments d'une fenêtre.

Les numéros de séquence à l'intérieur d'une fenêtre d'émission sont associés à des trames émises mais non acquittées. Un émetteur est donc limité à «**largeur de fenêtre**» trames émises et non acquittées.

Un récepteur ignore les numéros de séquences situés à l'extérieur de sa fenêtre de réception.

Le récepteur notifie dans l'acquittement le premier numéro de séquence disponible dans sa fenêtre.

L'émetteur retire de sa fenêtre d'émission les trames dont les numéros de séquences sont inférieurs à la dernière séquence acquittée.

#### **Fenêtres (Tx et Rx) avant acquittement**

SeqTx<sub>i1</sub>, SeqTx<sub>i2</sub>...SeqTx<sub>ip</sub>      SeqRx<sub>i1</sub>, SeqRx<sub>i2</sub>....SeqRx<sub>in</sub>  
Réception i1,i2, acquittement i3

Après acquittement.

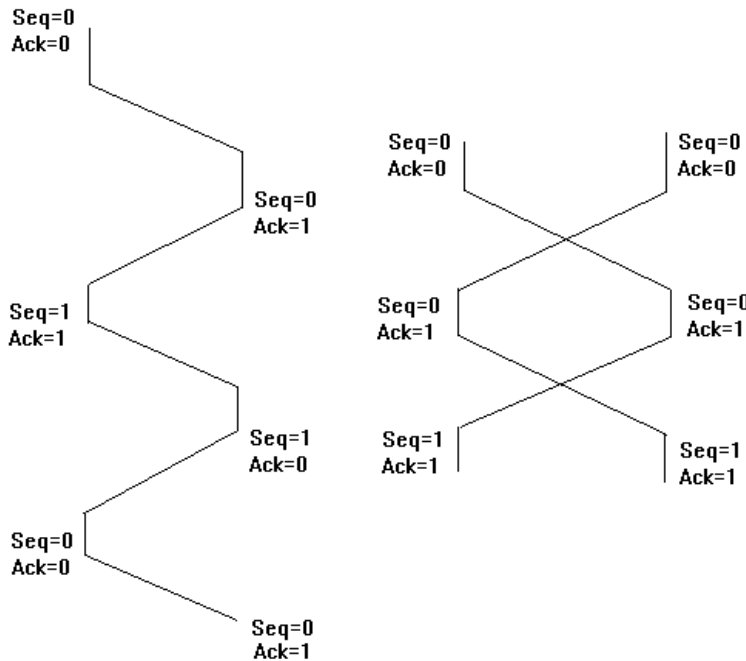
SeqTx<sub>i3</sub> SeqTx<sub>ip</sub>      SeqRx<sub>i3</sub>, SeqRx<sub>i4</sub>....SeqRx<sub>in+2</sub>

L'émetteur retire de sa fenêtre les séquences inférieures au numéro acquitté.

#### 7.2.3.1 Protocole à fenêtre glissante de largeur 1

La largeur de la fenêtre est égale à 1 - Les numéros de séquences possibles sont 0 ou 1.

- **sequence** : numéro de la trame émise.
- **ack** : numéro de la prochaine trame attendue.



### Cas 1

A (seq=0, ack=0)

B (seq=0, ack=1)

A (seq=1, ack=1)

B (seq=1, ack=0)

A (seq=0, ack=0)

### Cas 2

A (seq=0, ack=0) -

B(seq=0, ack=0)

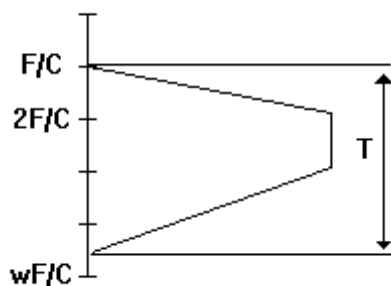
A (reçu seq n°0 - ack 0 ignoré) -> retransmission + ack reçu -> A (seq=0, ack=1)

B (reçu seq n°0 - ack 0 ignoré) -> retransmission + ack reçu -> B (seq=0, ack=1)

Chaque trame est transmise deux fois sur le canal.

### 7.2.3.2 Protocole à fenêtre glissante de largeur n

L'idée d'une fenêtre glissante de largeur n réside dans le fait que w trames soient émises avant la réception du premier acquittement qui aura pour effet de libérer un élément de la fenêtre d'émission. En d'autres termes le temps d'émission est suffisant pour que le premier acquittement survienne avant que la fenêtre d'émission ne soit saturée. Cette technique est dite **pipelining** (protocole pipe-line ou au fil de l'eau).



Soit C la capacité du canal en bit/s, F la taille d'une trame (en bits), T le temps aller retour, w la taille de la fenêtre

Si  $w F/C > T$ ,  $w > C * T / F$  le taux d'occupation du canal est égal à 100 %.

Si  $w < C.T / F$ , le taux d'occupation du canal devient  $w F / C.T$

Soit la probabilité L d'erreur (perte seq ou ack) :

$$\text{Taux d'occupation} = (1-L) \max(1, w.F / CT)$$

A un instant donné n trames au plus ont été émises et non acquittées, généralement  $n = 2^p$ , les trames ont des numéros de séquence compris entre 0 et  $2^p-1$ . L'acquittement représente la prochaine séquence attendue par le récepteur. La fenêtre d'émission peut être vide ou comporter au plus n trames, telles que le numéro de séquence de la 1<sup>re</sup> trame de la fenêtre ait pour valeur le dernier acquittement reçu.

Parmi les n trames émises, certaines peuvent être perdues ou reçues avec des erreurs.

Dans cas deux techniques de récupération sont possibles au niveau du récepteur :

- rejeter toutes les trames qui suivent la première trame erronée ou manquante (**GO-Back-N** - retour arrière de N trames)
- attendre la retransmission des trames manquantes par l'émetteur (après la réception d'un **NAK**, ou après expiration d'un chien de garde) - On parle de répétition sélective (**Selective Reject**).

### 7.3 Couche liaison de données X25 - X25 niveau 2

X25 est un protocole à fenêtre glissante. L'émetteur émet à nouveau les trames non acquittées au bout d'un temps T1. Le récepteur dispose d'un temps T2 ( $T2 < T1$ ) pour acquitter la réception d'une trame. Le récepteur demande une nouvelle émission de trames à partir d'un numéro N à l'aide de la commande REJ(N).

#### X25 comporte trois types de trames

Format des trames – Fonctionnement de base (modulo 8)

Ordre de transmission des bits	12345678	12345678	12345678	16 à 1	12345678	
	Fanion	Adresse	Commande	FCS	Fanion	
	F 01111110	A 8 bits	C 8 bits	FCS 16 bits	F 01111110	
Ordre de transmission des bits	12345678	12345678	12345678	16 à 1	12345678	
	Fanion	Adresse	Commande	Information	FCS	Fanion
	F 01111110	A 8 bits	C 8 bits	Info N bits	FCS 16 bits	F 01111110
FCS Séquence de contrôle de trame ( <i>frame check sequence</i> )						

#### 7.3.1 Les trames I d'information

La taille de la fenêtre est 7 ou 127 trames, les séquences sont numérotées au moyen de 3 bits (*modulo 8*) ou 7 bits (*modulo 128*), ou 15 bits (*modulo 32168*).

Le récepteur applique une stratégie de type **GO-Back-N**, c'est à dire le rejet des trames qui suivent une trame erronée.

#### 7.3.2 Les trames S de supervision

RR (.request,.response) prêt à recevoir.

RNR (.request,.response) non prêt à recevoir.

REJ (.request,.response) rejet.

#### 7.3.3 Les Trames U non numérotées.

*En fonctionnement de base - (modulo 8)*

SABM (.request) activation du mode asynchrone équilibré.

DISC (.request) déconnexion.

UA (.response) accusé de réception non numéroté

DM (.response) mode déconnecté

FRMR (.response) rejet de trame.



Bits du champ de commande	1	2	3	4	5	6	7	8
Trame I	0	N(S)			P	N(R)		
Trame S	1	0	S	S	P/F	N(R)		
Trame U	1	1	M	M	P/F	M	M	M
N(S)	Numéro de séquence en émission (l'élément binaire 2 étant de poids faible)							
N(R)	Numéro de séquence en réception (l'élément binaire 6 étant de poids faible)							
S	Bit de la fonction de supervision							
M	Bit de la fonction de modification							
P/F	Bit d'invitation à émettre lorsqu'il est issu d'une commande. Bit de fin lorsqu'il est issu d'une réponse (1 = invitation à émettre/fin)							
P	Bit d'invitation à émettre (1 = invitation à émettre)							

### 7.3.4 La procédure LAPB

- Procédure d'adressage.
- Procédure d'utilisation du bit P/F
- Procédure d'établissement et de déconnexion de la liaison
- Procédure de transfert de l'information.
- Procédure de remise à zéro de la liaison

### 7.4 La couche liaison de données LLC - ANSI/IEEE 802.2, ISO 8802/2

La sous couche LLC décrit trois types de protocoles.

#### 7.4.1 LLC type 1

Service sans connexion ni acquittement.

#### 7.4.2 LLC type 2

Service avec connexion, acquittement et contrôle de flux. Proche du LAPB décrit dans X25.

#### 7.4.3 LLC type 3

Service sans connexion avec acquittement. Peu utilisé.

#### 7.4.4 Interface LLC/Couche Réseau.

#### 7.4.5 Service sans connexion

L\_DATA.request  
L\_DATA.indication.

#### 7.4.6 Service avec connexion

- L\_CONNECT.request
- L\_CONNECT.indication
- L\_CONNECT.confirm
- L\_DISCONNECT.request
- L\_DISCONNECT.indication
- L\_DISCONNECT.confirm
- L\_DATA\_CONNECT.request

- L\_DATA\_CONNECT.indication
- L\_DATA\_CONNECT.confirm
- L\_RESET.request
- L\_RESET.indication
- L\_RESET.confirm
- L\_CONNECTION\_FLOWCONTROL.request
- L\_CONNECTION\_FLOWCONTROL.indication

#### 7.4.7 Interface LLC/MAC

- MA\_DATA.request
- MA\_DATA.indication
- MA\_DATA.confirm

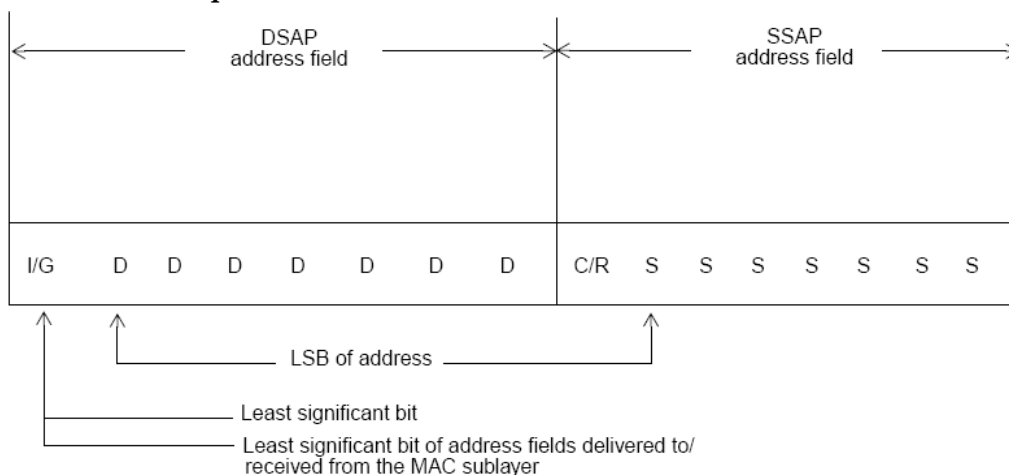
#### 7.4.8 Structure des PDU LLC

DSAP address	SSAP address	Control	Information
8 bits	8 bits	8 or 16 bits	M*8 bits

Un PDU LLC (LPDU) comporte les champs suivants :

- Adresse de destination DSAP
- Adresse de source SSAP - une adresse individuelle.
- Contrôle, 8 ou 16 bits
- Information binaire, 8.M bits

##### 7.4.8.1 Le champ adresse DSAP.



I/G = 0 Individual DSAP  
 I/G = 1 Group DSAP  
 C/R = 0 Command  
 C/R = 1 Response

X0DDDDDD DSAP address  
 X0SSSSSS SSAP address  
 X1DDDDDD Reserved for ISO definition  
 X1SSSSSS Reserved for ISO definition

Les adresses impaires sont des adresses de groupe. Certaines adresses sont réservées et affectées par l'IEEE.

xxxxxx1x

1111xx1x

00 - Null SAP

02 - LLC Sub Management Layer 802.1b

06 - DoD internet

04 - 05 - 08 - 0C SNA

F0 - Netbios.

### 7.4.8.2 Le champ contrôle

Il existe 3 types de PDU

- Les PDU d'information I format
- Les PDU de supervision S format
- Les PDU non numérotées U format (Unnumbered)

	LLC PDU control field bits									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-16
Information transfer command/response (I-format PDU)	0	N(S)							P/F	N(R)
Supervisory commands/responses (S-format PDUs)	1	0	S	S	X	X	X	X	P/F	N(R)
Unnumbered commands/responses (U-format PDUs)	1	1	M	M	P/F	M	M	M		

N(S) = sender send sequence number (Bit 2=lower-order-bit)  
 N(R) = sender receive sequence number (Bit 10=lower-order-bit)  
 S = supervisory function bit  
 M = modifier function bit  
 X = reserved and set to zero  
 P/F = poll bit—command LLC PDUs  
 final bit—response LLC PDUs  
 (1=poll/final)

**NB** : le bit P/F est utilisé en type 2 et 3. Il est utilisé pour solliciter une réponse (requête émise avec P=1). La réponse est reçue avec F=1.

### 7.4.8.3 Commandes non numérotées - type 1 - Contrôle == 8 bits.

b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8

1100P000 - UI - Unnumbered Information)

1111P101 - XID.request - Exchange IDentification

1111F101 - XID.response

1100P111 - TEST.request

1100F111 - TEST.response

#### **7.4.8.4 Commandes non numérotées - type 2 - Contrôle == 16 bits**

b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8  
11 11 P 110 -SABME - Set asynchronous Balanced Mode Extended.  
11 00 P 010 - DISC - Disconnect  
11 00 F 110 - UA - Unnumbered acknowledgment response  
11 11 F 000 - DM response - Disconnect Mode response  
11 10 F 001 - FRMR Frame Reject response

#### **7.4.8.5 Commandes non numérotées - type 3 - Contrôle == 8 bits**

b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8  
11 00 P 000 - UI (Unnumbered Information)  
11 00 F 110 - UA - Unnumbered acknowledgment response  
11 10 F 001 - FRMR Frame Reject response

#### **7.4.8.6 Commandes de supervision - type 2 - Contrôle == 16 bits**

b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8  
10 00 0000 RR Receive Ready  
10 01 0000 REJ REJect  
10 10 0000 RNR Receive Not Ready.

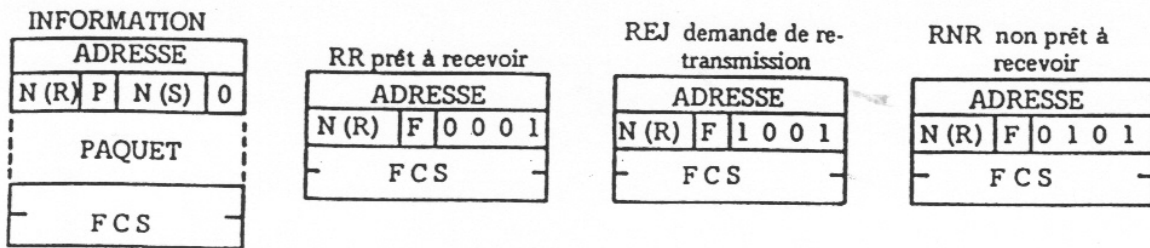
#### **7.4.8.7 Format des PDU associées à des données.**

En type 1 et 3 l'information est véhiculée par des PDU **UI** (UI = 03). Dans le type 2 on utilise le format I, les séquences sont numérotées par 7 bits (0...127).

#### **7.4.9 Exemple de PDU.**

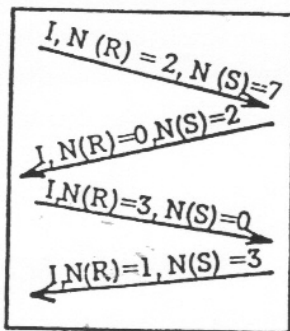
20 20 03 : DSAP=20, SSAP=20, UI=03  
AA AA 03 00 00 00 : SNAP identifiant l'encapsulation d'un paquet internet.  
AA AA 03 00 00 00 08 00 : encapsulation d'un paquet IP

### 7.5 Illustration du fonctionnement de X25 niveau 2

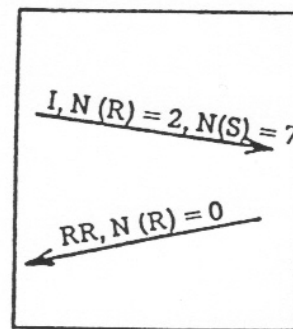


Format des trames I, RR, RNR et REJ

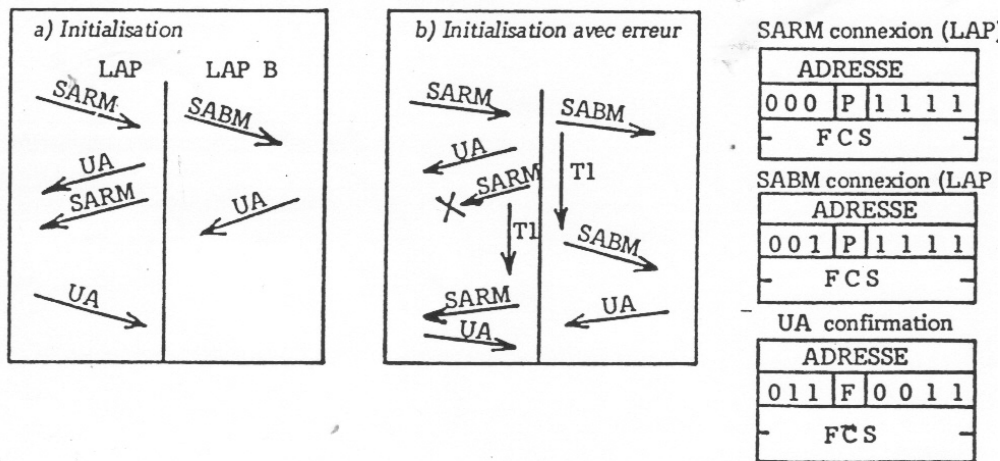
a) Transfert d'information dans les deux sens



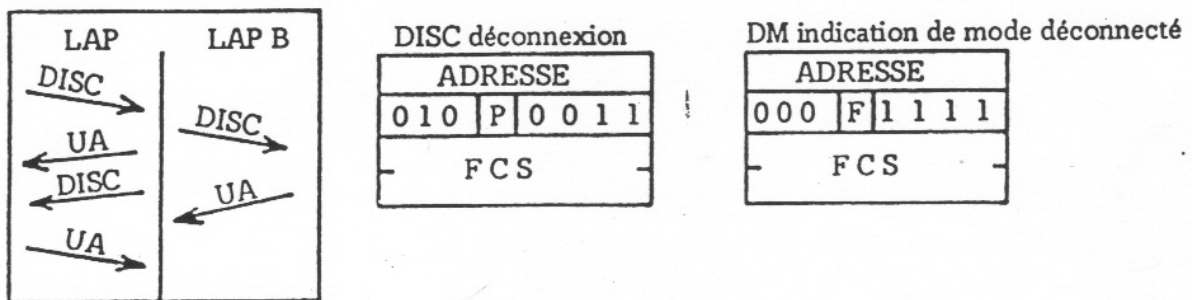
b) Transfert dans un seul sens



Mécanisme d'acquittement



Procédure d'initialisation et format des trames utilisées

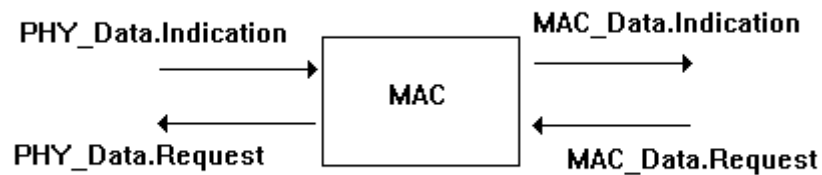


Procédure et trames de déconnexion

## 8. La sous couche MAC

### 8.1 Introduction

La couche physique fournit les méthodes et les moyens de transmettre un flux binaire  $b_k$  sur un média. Lorsque le média est accessible par plusieurs utilisateurs il devient nécessaire d'établir des règles d'accès à ce milieu afin d'en permettre le partage. La sous couche MAC structure l'information sous forme de **trames** et définit les protocoles qui gèrent l'accès au média.



### 8.2 Classification des méthodes d'accès.

On peut répartir les méthodes d'accès en trois catégories

- Les **liaisons point à point**, dans ce cas le réseau ne comporte que deux noeuds (on parle parfois de **canal**), la méthode d'accès peut être implicite (par exemple une liaison RS232 - tty - entre un terminal et une machine Unix).
- Le **multiplexage synchrone**, un temps d'accès constant est alloué à chaque noeud du réseau (technique dite **T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess).
- Le **multiplexage asynchrone**, un temps d'accès est attribué en fonction des besoins, cette catégorie se divise en deux grandes classes :
  - Les méthodes d'accès aléatoires.
  - Les méthodes d'accès contrôlées.

### 8.3 Une méthode d'accès aléatoire le CSMA

Le réseau ALOHA créé dans les années 70 par l'université d'Hawaii, se proposait de relier différentes îles au moyen d'émetteur-récepteur UHF. Des trames de 704 bits maximum sont transmises à 9600 bauds (donc durant un temps maximum de  $704 / 9600 * 1000 = 73$  ms).

L'idée de base consiste à autoriser les nœuds du réseau à émettre librement. Lorsque deux nœuds transmettent simultanément il se produit une **collision**. Un émetteur détecte la destruction de sa trame et observe un certain délai avant sa répétition. Un tel système ou plusieurs nœuds se partagent un canal unique est dit à **contention**.

On considère un nombre infini d'utilisateurs.

Les trames ont une durée moyenne  $t_0$

On note  $S$  le nombre moyen de trames sans collisions transitant sur le canal par durée de trame.  $S$  sera compris entre 0 et 1 ( $0 < S < 1$ ) pour une utilisation possible du canal. Le processus est supposé poissonien, c'est à dire que la loi de distribution s'écrit :

$$p(\text{NTx} = k) = e^{-S} S^k / k! = \text{Sr}(k)$$

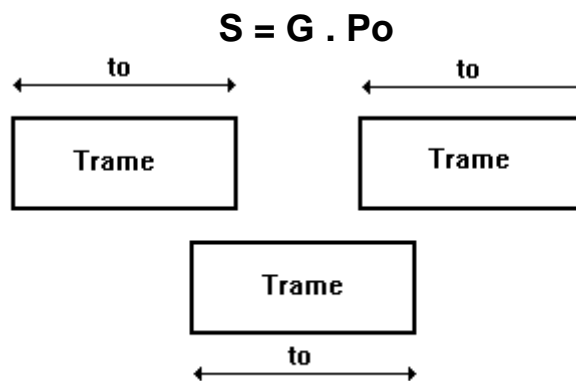
NTx nombre de trames transmises/durée de trame  
k un entier positif ou nul.

On note par G la moyenne du nombre de tentative d'émission de trame, par durée de trame, le processus de tentative de transmission est supposé également poissonien. A l'évidence G est supérieur ou égal à S.

$$p(\text{NrTx} = k) = e^{-G} G^k / k! = \text{Gr}(k)$$

NrTx nombre de tentatives d'émission/durée de trame  
k un entier positif ou nul.

Soit Po la probabilité qu'une trame soit transmise sans collision,



Une trame sera transmise sans collision, si aucune autre tentative d'émission ne se produit durant 2.t0

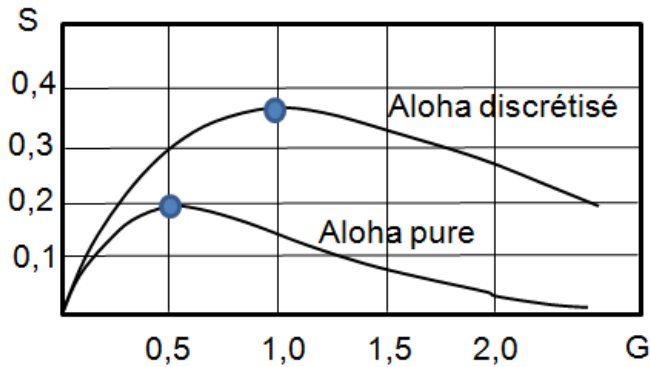
Probabilité de n'avoir aucune tentative d'émission durant t0 =  $e^{-G}$  (k=0)  
Probabilité de n'avoir aucune tentative d'émission durant 2.t0 =  $e^{-2G}$

D'où l'on déduit  $Po = e^{-2G}$ , soit

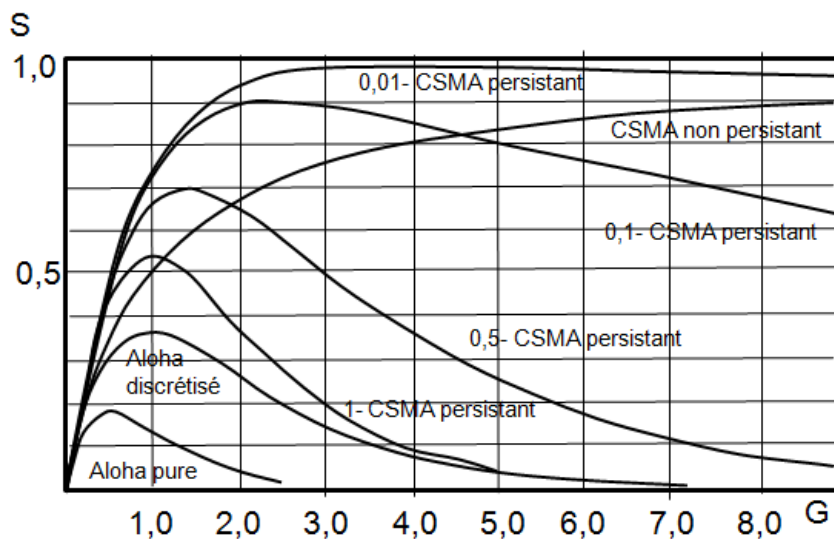
$$S = G . e^{-2G}$$

Cette méthode est connue sous le nom de pur ALOHA. Une variante connue sous le nom de ALOHA discrétisé (Slotted ALOHA - Roberts 1972) propose de synchroniser les noeuds sur une horloge de période fixe t0. On obtient dans ce cas :

$$S = G . e^{-G}$$



En conclusion le meilleur taux d'occupation du canal S est  $1/2e$  pour l'aloa pur et  $1/e$  pour l'aloa discrétisé.



### 8.3.1 CSMA persistant et non persistant.

Les protocoles caractérisés par l'écoute des informations sur le média portent le nom de protocoles à détection de porteuse (*carrier sense protocol*)

#### 8.3.1.1 CSMA 1-persistent.

Dans le **Carrier Sense Multiple Access** persistant (accès multiple par écoute de la porteuse), un nœud attend que le canal soit libre avant d'émettre une trame. Lorsque le canal est disponible la trame est émise, si une collision se produit le nœud attend un intervalle de temps variable et aléatoire avant une nouvelle émission. Ce protocole est dit 1 persistant, car la probabilité d'émettre est égal à 1 si le canal est disponible.

#### 8.3.1.2 CSMA non persistant

Si le canal est occupé une nouvelle tentative se produit après un intervalle de temps aléatoire.



### 8.3.1.3 CSMA p persistant.

Cette méthode est utilisée dans les canaux qui utilisent des intervalles de temps pour les contrôles d'accès. Si le canal est disponible le nœud transmet une trame avec une probabilité p. La probabilité d'attendre un nouvel intervalle est donc 1-p. Le processus se poursuit jusqu'à que l'information soit effectivement transmise. Si le canal n'est pas disponible le nœud attend l'intervalle de temps suivant.

### 8.3.1.4 CSMA/CD

Le CSMA/CD (**Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection**) consiste à arrêter toute émission sitôt qu'une collision est détectée. Après une collision la trame est réémise, si le canal est disponible au terme d'une attente de durée aléatoire.

Soit  $\tau$  le temps de propagation maximum entre deux nœuds, une collision est détectée par l'émetteur au bout d'un temps maximal  $2\tau$  ( $\tau$  temps pour que la trame atteigne le nœud le plus éloigné et  $\tau$  le temps nécessaire à la collision pour se retro-propager vers l'émetteur). On en déduit que l'émetteur d'une trame doit attendre  $2\tau$  pour être certain de détecter une collision, autrement dit l'intervalle de temps minimum entre deux trames émises est  $2\tau$ , la longueur minimale d'une trame est  $2\tau$ .

Par exemple la longueur minimale d'une trame 802.3 est de 512 bits (1bit == 0.1  $\mu$ s), la vitesse minimale de l'onde est 0.65c (0.65.3.10<sup>8</sup> m/s - 5  $\mu$ s/km), la distance maximale entre deux stations est donc  $\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-6}$  m # 5000 m.

### 8.3.2 Le protocole 802.3 CSMA/CD

slotTime	512 bits times (51.2 $\mu$ s)
interFrameGap	9.6 $\mu$ s
maxFrameSize	1518 octets
minFrameSize	512 bits (64 octets).
attemptLimit	16 (nombre maximum de tentative d'émission)

Délai de retransmission : un nombre aléatoire de r slotTime

$$0 < r < 2^k, k = \min(n,10), n = \text{nombre de tentatives.}$$

Supposons que k nœuds soient toujours prêts à émettre. La probabilité de transmission p dans chaque intervalle de temps T est constante.

La probabilité A pour qu'un nœud occupe le média s'écrit :

$$C_k^1 p (1-p)^{k-1} = k p (1-p)^{k-1} \quad A \text{ est maximum pour } p=1/k \quad (A=1/e).$$

La probabilité (p(j)) pour qu'une période de contention comporte j intervalles de temps s'écrit  $A(1-A)^{j-1}$

La période moyenne de contention est donc

$$\sum_{j=1}^{\infty} j A (1-A)^{j-1} = 1/A$$

Si l'on fixe la durée T à  $2\tau$  on obtient un temps moyen de  $2\tau/A$ , toujours inférieur à  $2\tau$  e # 5.4  $\tau$ .

Soit P la durée moyenne de la trame

Efficacité du canal =  $P / (P + 2\tau/A) = 1 / (1 + 2\tau/A P)$  (P bits utiles tous les P + 2τ/A)

Soit D le débit binaire ( $10^7$  bits/s).

L la longueur d'une trame en μs (51.2μs - 64 octets...1214.4μs - 1518 octets)

v la vitesse de propagation des signaux ( $2 \cdot 10^8$  m/s - 5μs/km)

T = 2.τ, intervalle de temps - 51.2 μs

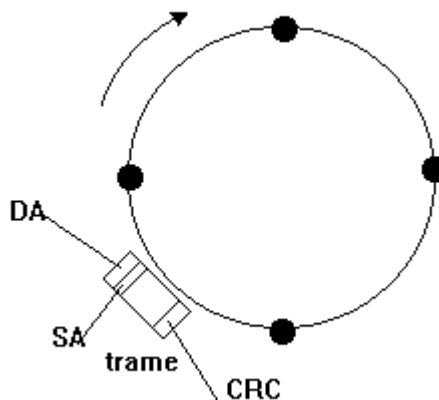
A = 1/e

$$S = 1 / (1 + 51.2 \cdot 2.7 / L)$$

$$L = 51.2 \mu s \text{ (64 octets)} \quad S < 0.27$$

$$L = 819.2 \mu s \text{ (1024 octets)} \quad S < 0.85$$

#### 8.4 Une méthode d'accès déterministe, les anneaux à jeton.



On considère une topologie en anneau (**token ring**), qui comporte n noeuds. L'information est échangée sous forme de trame. Un jeton (token) est matérialisé par une trame particulière. Soit tpd le temps de propagation d'un signal le long de l'anneau, on obtiendra un nombre maximum de jeton par unité de temps :

$$\text{token\_max} = 1/\text{tpd}.$$

Il n'existe qu'un seul jeton sur l'anneau, un noeud qui capture le jeton a le droit d'émettre des trames, les autres noeuds écoutent.

Afin d'éviter qu'une trame ne tourne plusieurs fois sur l'anneau l'émetteur d'une trame la détruit lors de son retour.

Un noeud qui ne détient pas le jeton répète toutes les trames incidentes.

Les trames de données comportent une adresse MAC de destination (pour atteindre un noeud cible) et une adresse MAC de source (pour permettre la destruction de la trame par son émetteur).

Supposons que l'on mesure le temps de rotation Tr du jeton en un point de l'anneau,

$Tr_i = \text{tpd} + Tu_i$ , où Tu représente une charge utile de donnée.

Soit pour n tours  $\sum Tr_i = n \text{ tpd} + \sum Tu_i = T_m$

D'où  $\sum Tu_i / T_m = \text{charge utile} = 1 - \text{tpd} \cdot n / T_m$

On obtient la charge utile d'un anneau à jeton à partir du nombre moyen de jeton par seconde <token\_rate> et du temps de propagation sur l'anneau (tpd)

charge utile =  $1 - \text{tpd} \cdot \text{token\_rate}$

Remarque: dans l'anneau à jeton FDDI le temps de rotation du jeton est limité à Top, on obtient donc une charge utile (efficacité) maximale  $1 - \text{tpd}/\text{Top}$ .

## 8.5 Notion de trame MAC

L'information est organisée sous forme de trame, dont la forme usuelle est la suivante :

**Préambule:** ensemble de n symboles destinés à la synchronisation du récepteur (extraction de l'horloge).

**SD :** Start delimiter, identifie le début de trame

**DA:** Adresse de destination, identifie le destinataire de l'information.

**SA :** Adresse de source, identifie la source de l'information.

**Données:** une suite de symboles (octets en général)

**FCS:** Frame Check Sequence, somme de contrôle de la trame.

### 8.5.1 Structure d'une adresse IEEE.

La longueur d'une adresse est de 48 bits, numérotés de 47 à 0 (48 bits == 6 octets)

#### 8.5.1.1 Adresses individuelles.

Une adresse d'un noeud sur le réseau (le bit 47 I/G est égal à 0).

#### 8.5.1.2 Adresses de groupe

Une adresse associée à un ou plusieurs noeud du réseau (I/G = 1). On distingue:

- les adresses **multicast**, allouées à un groupe de noeuds par certaines conventions.
- les adresses **broadcast** qui désignent tous les noeuds du réseaux (les 48 bits sont à un dans ce cas, adresse = FFFF FFFF FFFF)

#### 8.5.1.3 Adresse locales

L'espace d'adressage peut être partitionné en deux domaines administrés localement ou globalement (bit 46 U/L). Une adresse globale est affectée de manière unique à un noeud.

#### 8.5.1.4 OUI

Les trois premiers octets de l'adresse sont affectés par l'IEEE et permettent d'identifier le matériel d'un industriel particulier (IBM...).

### 8.5.2 Détection des erreurs - CRC - Cyclical Redundancy Check

Le CRC est une méthode couramment utilisée pour fournir une clé de vérification de trame ( FCS). Son principe consiste à associer un polynôme à une trame :

$$P_{k-1}(x) = a_{k-1} x^{k-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \text{ (degré } k-1 \text{ pour une trame de } k \text{ bits)}$$

Les coefficients  $a_i$  sont les bits de la trame. Toutes les opérations sont effectuées en modulo 2.

On définit  $L_{n-1}(x) = x^{n-1} + x^{n-2} + \dots + x + 1$

Un polynôme générateur  $G_n(x)$  de degré  $n$  est utilisé pour obtenir le reste  $R(x)$  de la division de  $x^n P_{k-1}(x) + x^k L_{n-1}$  par  $G_n(x)$

$R(x)$  est polynôme de degré inférieur ou égal à  $n-1$ .

$$R(P_{k-1}(x)) = (x^n P_{k-1}(x) + x^k L_{n-1}(x)) / G_n(x)$$

Un polynome de degré  $m-1$ ,  $M_{m-1}$ , est transmis ( $m = n + k$ )

$$M_{m-1} = x^n P_{k-1}(x) + FCS$$

$$FCS = R(x) + L_{n-1} \text{ ( un polynome de degré } n-1 \text{)}$$

On montre que la quantité  $C$  (Clé) est une constante

$$C = R(M_{m-1}(x)) = x^n L_{n-1}(x) / G_n(x)$$

Exemple

$G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$  (avis V41 du CCITT).

trame 0101 1010 0110 1011 1100 0111 0010 0001 5A 6B C7 21

clé 0001 1101 0000 1111 1D0F

### 8.5.2.1 FCS - 802.3

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

$L_{31}(x)$  est un polynome de degré 31.

$P_{k-1}(x)$  est un polynôme de degré  $k-1$  si la trame comporte  $k$  bits (de DA inclus à FCS exclus). Le premier bit de l'adresse correspond au terme  $x^{n-1}$ , **attention** dans 802.3 un octet est transmis avec le bit de poids faible en tête (sauf pour le CRC).

Le CRC est transmis dans l'ordre  $x^{31}, \dots, x^0$

### 8.5.2.2 FCS - FDDI

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

$L_{31}(x)$  est un polynome de degré 31.

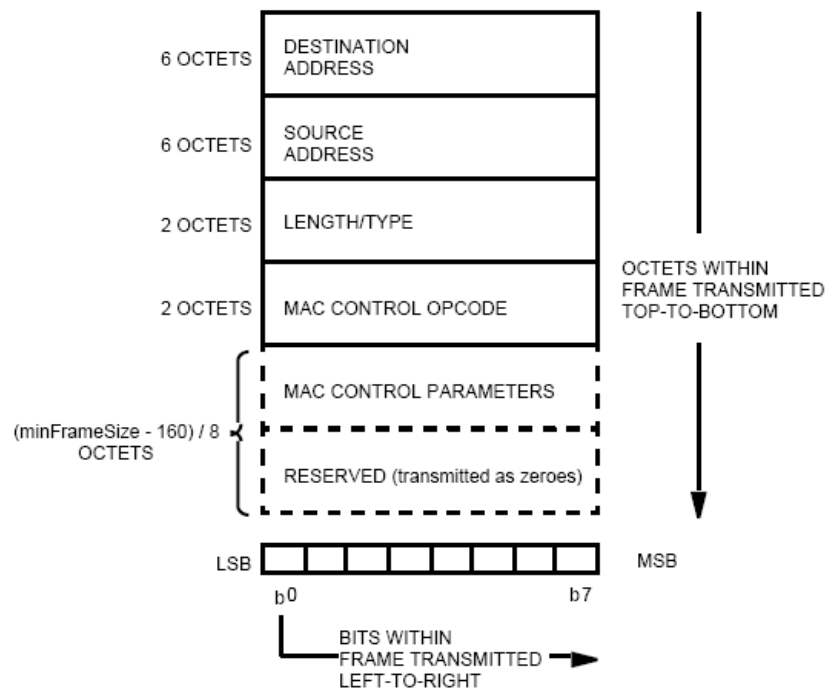
$P_{k-1}(x)$  est un polynôme de degré  $k-1$  si la trame comporte  $k$  bits (de FC à FCS exclus), attention dans FDDI un octet est représenté avec un bit de poids fort en tête.

Le CRC est transmis dans l'ordre  $x^{31}, \dots, x^0$

La clé a pour valeur C7 04 DD 7B

## 8.5.3 Exemples de frames

### 8.5.3.1 Format des frames 802.3

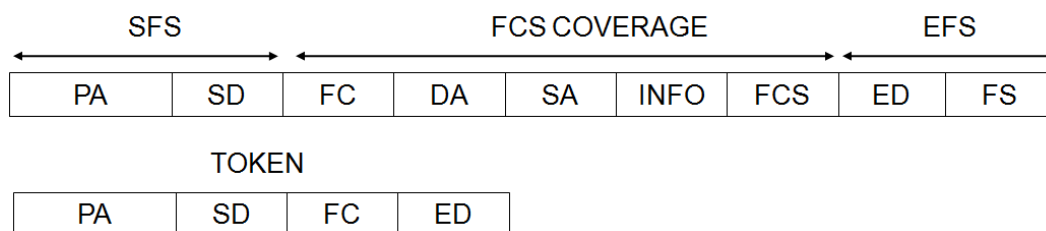


La longueur maximale de la trame est 1518 octets (1500 octets de données), la longueur minimale 64 octets. Un champ longueur indique la taille de données utiles. Le champ longueur est donc compris entre 0 et 1500, une valeur supérieure à 2048 (0800 en hexadécimal est utilisée pour l'encapsulation de paquets IP).

#### Remarque

Un réseau Ethernet comporte au plus 5 segments reliés par 4 répéteurs. Un segment à base de câble coaxial est long de 185m au plus et comporte au plus 30 noeuds.

### 8.5.3.2 La trame FDDI.



SFS, Start Of Frame Sequence  
 PA, Preamble (16 or more symbols)  
 SD, Starting Delimiter (2 symbols)  
 FC, Frame Control (2 symbols)  
 DA, Destination Address (4 or 12 symbols)  
 SA, Source Address (4 or 12 symbols)

INFO, Information (0 or more symbols pairs)  
 FCS, Frame Check Sequence (8 symbols)  
 EFS, End Of Frame Sequence  
 ED, Ending Delimiter (1 symbol)  
 FS, Frame Status (3 or more symbols)

La trame FDDI comporte au plus 9000 symboles (préambule inclus) (1 symbole == 5 bits, un octet est représenté par deux symboles), le champ information est donc limité à  $9000 - (16 + 2 + 2 + 12 + 12 + 8 + 4) = 9000 - 56 = 8944$  symboles (4472 octets).

Un anneau FDDI comporte au plus 500 noeuds, pour une longueur totale de 200 km.

### 8.5.3.3 La trame X.25

Format des trames – Fonctionnement de base (modulo 8)

Ordre de transmission des bits	12345678	12345678	12345678	16 à 1	12345678	
	Fanion	Adresse	Commande	FCS	Fanion	
	F 01111110	A 8 bits	C 8 bits	FCS 16 bits	F 01111110	
Ordre de transmission des bits	12345678	12345678	12345678	16 à 1	12345678	
	Fanion	Adresse	Commande	Information	FCS	Fanion
	F 01111110	A 8 bits	C 8 bits	Info N bits	FCS 16 bits	F 01111110
FCS Séquence de contrôle de trame ( <i>frame check sequence</i> )						

#### X25 - Fonctionnement de base.

La trame X25 comporte au plus 135 octets (fanion exclus), soit 135-4 octets d'information pour le fonctionnement de base.

## Le programme crc.c

Reste de  $x^{16}$ .P par  $x^{16}+x^{12}+x^5+1$

[0016 bits] 1100.1101.1000.1010

Trame X25

[0008 bits] 0010.1001

CRC

[0016 bits] 1010.1011.0100.0100

Reste X25, 1D0F

[0013 bits] 1.1101.0000.1111

Trame FDDI

[0104 bits]

0100.0000.0000.0000.0000.0001.0111.1100.0100.0000.1000.1111.1000.000

0.0000.0000.0000.0001.0111.1100.0100.0000.1000.1111.1000.0000

CRC FDDI

[0032 bits] 1111.1100.0001.0010.1010.0001.1011.0000

Reste FDDI C7 04 DD 7B

[0032 bits] 1100.0111.0000.0100.1101.1101.0111.1011

```
#include <stdio.h>
```

```
typedef struct { int n_octets ;
                int n_bits   ;
                char bit[1024] ;
                char octet[128] ;
                } POLY ;
```

```
int octet_to_bit(POLY *p) ;
int NormPoly(POLY *p) ;
int division(POLY *p, POLY*q, POLY *r);
int XnPoly(POLY *p,int n) ;
int AddPoly(POLY *pr, POLY *po) ;
int PrintPoly(char *s,POLY *p) ;
```

```
POLY p1 ;
POLY p2 ;
POLY p3 ;
POLY p4 ;
POLY p5 ;
POLY r1 ;
POLY r2 ;
```

```
main()
{
    p2.n_octets = 3 ;
    p2.octet[0] = 0x01 ;
    p2.octet[1] = 0x10 ;
    p2.octet[2] = 0x21 ; /* 1.0001.0000.0010.0001 -> x16 + x12 + x5 + 1 */
    octet_to_bit(&p2) ;

    p1.n_octets = 4 ;

    p1.octet[0] = 0x5A ;
    p1.octet[1] = 0x6B ;
    p1.octet[2] = 0xC7 ;
    p1.octet[3] = 0x21 ;
```

```

octet_to_bit(&p1)      ;

p3.n_octets = 2 ;
p3.octet[0] = 0xFF ;
p3.octet[1] = 0xFF ;
octet_to_bit(&p3) ;
*&p4 = *&p3 ;

XnPoly(&p3,p1.n_bits) ;

XnPoly(&p1,16) ;
division(&p1,&p2,&r1) ;
PrintPoly("Reste de x16.P par x16+x12+x5+1",&r1);

p1.n_octets = 1 ;
p1.octet[0] = 0x29 ; /* x5 + x3 + 1 -> 0010 1001 */
octet_to_bit(&p1) ;
PrintPoly("Trame X25",&p1);

p3.n_octets = 2 ;
p3.octet[0] = 0xFF ;
p3.octet[1] = 0xFF ;
octet_to_bit(&p3) ;
*&p4 = *&p3 ;

XnPoly(&p3,p1.n_bits); /* xk (x15+x14+...+x2+x1) */
XnPoly(&p1,16) ; /* x16 . G(x) */
*&p5 = *&p1 ;
AddPoly(&p1,&p3) ;
division(&p1,&p2,&r1) ;
AddPoly(&r1,&p4) ;
*&p1 = *&p5 ;
AddPoly(&p1,&r1) ;
PrintPoly("CRC",&r1) ;

p3.n_octets = 2 ;
p3.octet[0] = 0xFF ;
p3.octet[1] = 0xFF ;
octet_to_bit(&p3) ;
*&p4 = *&p3 ;

XnPoly(&p3,p1.n_bits);
XnPoly(&p1,16) ;
AddPoly(&p1,&p3) ;
division(&p1,&p2,&r1) ;
PrintPoly("Reste X25, 1D0F",&r1);

p2.n_octets = 5 ;
p2.octet[0] = 0x01 ;
p2.octet[1] = 0x04 ;
p2.octet[2] = 0xC1 ;
p2.octet[3] = 0x1D ;
p2.octet[4] = 0xB7 ;
octet_to_bit(&p2) ;

p1.n_octets = 13 ;
p1.octet[0] = 0x40 ;
p1.octet[7] = p1.octet[1] = 0x00 ;
p1.octet[8] = p1.octet[2] = 0x01 ;
p1.octet[9] = p1.octet[3] = 0x7C ;
p1.octet[10] = p1.octet[4] = 0x40 ;
p1.octet[11] = p1.octet[5] = 0x8F ;
p1.octet[12] = p1.octet[6] = 0x80 ;
octet_to_bit(&p1) ;

```



```

PrintPoly("Trame FDDI",&p1);

p3.n_octets = 4 ;
p3.octet[0] = 0xFF ;
p3.octet[1] = 0xFF ;
p3.octet[2] = 0xFF ;
p3.octet[3] = 0xFF ;
octet_to_bit(&p3) ;
*&p4 = *&p3 ;

XnPoly(&p4,p1.n_bits) ;
XnPoly(&p1,32) ;
*&p5 = *&p1 ;
AddPoly(&p1,&p4) ;

division(&p1,&p2,&r1) ;
AddPoly(&r1,&p3) ;
PrintPoly("CRC FDDI",&r1);
*&p1 = *&p5 ;
AddPoly(&p1,&r1) ;

p3.n_octets = 4 ;
p3.octet[0] = 0xFF ;
p3.octet[1] = 0xFF ;
p3.octet[2] = 0xFF ;
p3.octet[3] = 0xFF ;
octet_to_bit(&p3) ;
*&p4 = *&p3 ;

XnPoly(&p4,p1.n_bits) ;
XnPoly(&p1,32) ;
AddPoly(&p1,&p4) ;
division(&p1,&p2,&r1) ;
PrintPoly("Reste FDDI C7 04 DD 7B",&r1);

return(0);
}

int division(POLY *pp, POLY*qq, POLY *r)
{ int more = 1,i,cint ;
  POLY p,q ;

  *&p = *pp ;
  *&q = *qq ;

  NormPoly(&p);NormPoly(&q);

  if (q.n_bits > p.n_bits) { *r = *&p;return(0) ; } /* q > p */

  while(more)
  { for(i=0;i<q.n_bits;i++)
    { cint = 2+ (int) p.bit[i] ;
      cint -= (int) q.bit[i] ;
      cint = cint % 2 ;
      p.bit[i] = (char) cint ;
    }

    NormPoly(&p) ;
    if (q.n_bits > p.n_bits) { *r = *&p ; more=0 ; } /* p = q */
  }
return(0);
}

```

```

}

int octet_to_bit(POLY *p)
{ int i,j,k=0 ;
  char un_bit,premier=0 ;

  for(i=0;i<p->n_octets;i++)
  { for(j=0;j<8;j++)
    { un_bit = 0x01 & (p->octet[i] >> (7-j) ) ;
      if ( (premier==1) && (un_bit == 0) ) ;
      else
      { if (premier == 1) premier=0;
        p->bit[k]=un_bit ;
        k++ ;
      }
    }
  }
  p->n_bits = k ;
  return(0) ;
}

int NormPoly(POLY *p)
{ int i,premier=1,k=0 ;
  for (i=0;i < p->n_bits ;i++)
  { if ( (premier==1) && (p->bit[i] == 0) ) ;
    else
    { if (premier == 1) premier = 0 ;
      p->bit[k] = p->bit[i] ;
      k++ ;
    }
  }
  p->n_bits = k ;
  return(0);
}

PrintPoly(char *s,POLY *p)
{ int i ;

  printf("%s\n[%04d bits] ",s,p->n_bits);
  for(i=0;i<p->n_bits;i++)
  { printf("%d", (int)p->bit[i]);
    if ((i!=(p->n_bits-1)) && ((p->n_bits-i-1)%4) == 0) printf(".");
  }
  printf("\n");
  return(0);
}

int XnPoly(POLY *p,int n)
{ int i ;
  for(i=0;i<n;i++) p->bit[p->n_bits+i]=0 ;
  p->n_bits += n ;
  return(0);
}

int AddPoly(POLY *pr, POLY *pa)
{ int i, cint ;
  POLY po ;

  *&po = *pa ;

  if (pr->n_bits >= po.n_bits)
  { for (i=0;i<po.n_bits;i++)
    { cint = (int) po.bit[i] ;
      cint += (int) pr->bit[i+ pr->n_bits - po.n_bits] ;
      cint = cint % 2 ;
    }
  }
}

```

```

    pr->bit[i+ pr->n_bits - po.n_bits] = (char) cint ;
}
else
{ for (i=0;i<pr->n_bits;i++)
  { cint = (int) pr->bit[i] ;
    cint += (int) po.bit[i+ po.n_bits - pr->n_bits] ;
    cint = cint % 2 ;
    po.bit[i+ po.n_bits - pr->n_bits] = (char) cint ;
  }
  *pr = *(&po) ;
}
return(0) ;
}

```

## 9. La couche Réseau OSI (3)

### 9.1 Introduction

La couche réseau est responsable de l'acheminement de **paquets** de bout en bout à travers l'ensemble du réseau. **Le** réseau est un ensemble diffus de sous réseaux, la couche réseau met en oeuvre tous les moyens nécessaire pour adapter ses paquets aux caractéristiques des sous réseaux traversés.

La couche réseau fournit ses **services** à la couche transport, dont les caractéristiques essentielles sont les suivantes :

- Les services sont indépendants de la technologie du sous réseau sur lequel s'appuie la couche 3.
- En particulier la couche transport est indépendante de toute particularité des sous réseaux.
- Les adresses réseaux désignent de manière univoque un noeud **du** réseau.

### 9.2 La couche 3 OSI

La norme **ISO 8348** (Network Service Definition) décrit les **services** de la couche 3.

La norme **ISO 8208** (X.25 Packet Level Protocol for Data Terminal Equipment) décrit le protocole en mode **orienté connexion**.

La norme **ISO 8473** (Protocol for providing the connectionless-mode network service) décrit le protocole en mode **sans connexion**. IP (Internet Protocol) s'apparente à ce dernier protocole.

#### 9.2.1 Service avec et sans connexion

X25 dont le support naturel est le réseau téléphonique sous-entend de manière implicite l'usage d'une couche réseau en mode connecté. IP au contraire s'apparente au mode non connecté.

	Service avec connexion	Service sans connexion
initialisation	Nécessaire	Impossible
Adresse du destinataire	A la connexion	Dans chaque paquet
Ordre d'arrivé des paquets	Garanti	Non Garanti
Contrôle d'erreur	Par la couche Réseau	Par la couche transport.
Contrôle de flux	Par la couche réseau	
Négociation des options Identificateurs de connexion	Oui	Non

Les données issues d'une couche réseau avec connexion sont exemptes d'erreurs ce qui simplifie d'autant les services de la couche transport. A l'opposé une couche réseau sans connexion requiert l'utilisation d'une couche transport capable de détecter et de récupérer les paquets perdus.

#### 9.2.2 L'adressage au niveau réseau.

La structure d'une adresse réseau est proposée dans **ISO 8348 appendum 2**. Ce schéma d'adressage est hiérarchisé, l'adresse contient des informations sur la route à utiliser. **Le** réseau global est divisé en domaines et sous-domaines.

Une adresse NSAP comporte trois champs:

- l'**AFI**, *Authority and Format Identifier* identifie le type d'adresse présent dans le troisième champ. L'AFI est un nombre compris entre 1 et 99 (1 octet qui code sdeux digits BCD).
- l'**IDI**, *Initial Domain Identifier* précise le domaine auquel appartient le DSP (réseau téléphonique ...).
- le **DSP**, *Domain Specific Part* identifie un élément du domaine.

La partie domaine intial de l'adresse (IDP) comporte les champs AFI et IDI

<-----IDP----->

AFI	IDI	DSP
-----	-----	-----

L'adresse NSAP est de longueur variable, jusqu'à 40 chiffres décimaux ou 20 octets.

**Exemple:** l'avis d'adressage X121 du réseau X25:

- AFI38 (2 chiffres - 1 octet)
- IDI : les trois chiffres (1.5 octet) du code pays (USA 310 à 329, France 208 à 212, ...)
- DSP
  - 1° chiffre (½ octet) longueur de l'adresse en ½ octets (16 chiffres - 8 octets maximum).
  - Code pays - 3 chiffres
  - Code réseau -(téléx, réseau téléphonique ...)
  - Code région - 7 chiffres
  - Extension locale - 3 chiffres
  - Réservés pour les extensions futures - 2 chiffres.

### 9.3 La couche 3 IP

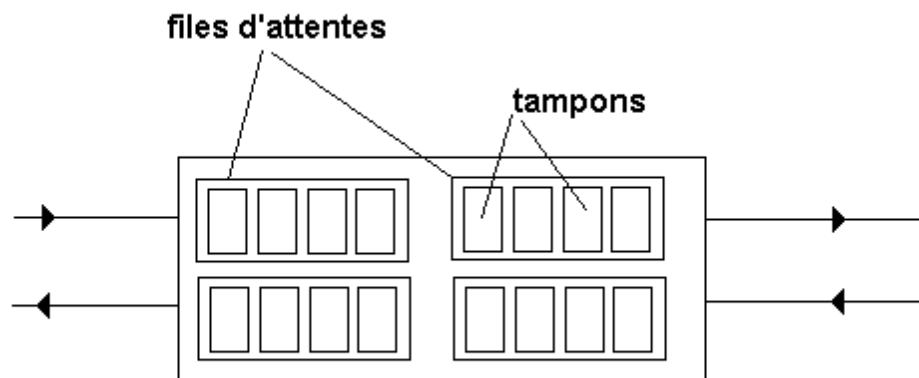
#### 9.3.1 Adressage IP.

Une adresse IP est un mot de 32 bits soit 4 octets. Elle se décompose en deux parties un poids fort qui est un numéro de réseau élémentaire et un poids faible qui est l'adresse d'un hôte dans ce réseau.

En notant l'adresse b31 b30 b29 b28... b3 b2 b1 b0

- Réseau **Classe A**, b31 =0  
b30...b24 numéro de réseau b23...b0 numéro d'hôte.
- Réseau **Classe B**, b31 b30 =10  
b29...b16 numéro de réseau, b15...b0 numéro d'hôte.
- Réseau de **Classe C**, b31 b30 b29 =110  
b28...b8 numéro de réseau, b7...b0 numéro d'hôte.
- Réseau de **Classe D**, b31 b30 b29=111.

## 9.4 Le routage (au sens OSI)



**Structure d'un IMP.**

Une connexion est appelée *circuit virtuel* par analogie avec les circuits physiques du téléphone. Les circuits virtuels sont établis grâce à ma procédure de connexion.

Les paquets transmis sans connexion (par exemple dans le cas de la couche 3 IP, non connectée) sont dénommés *datagramme* (par analogie avec télégramme).

	Datagramme	Circuit Virtuel
Initialisation du circuit	Pas nécessaire	Nécessaire
Adressage	Chaque paquet comporte les adresses de l'émetteur et de la destination	Numéro de circuit virtuel destination.
Information de routage	Dynamique.	Statique.- mémorisé dans les tables de routage.
Routage	A chaque paquet.	Lors de la phase d'initialisation
Contrôle de congestion	Aucun	Tous les circuits virtuels utilisés sont détruits en cas de perte de connexion.
Complexité	Dans la couche transport.	Dans la couche réseau

Les algorithmes de routage se répartissent en deux classes **adaptatives et non adaptatives** (on parle également de **routage statique**). Les algorithmes adaptatifs prennent en compte le taux de charge des sous réseaux traversés. Ils se divisent en **centralisés** (utilisent des informations collectées sur l'ensemble du réseau), **isolés** (informations locales) et distribués (mixage des informations locales et globales). Lorsque trop de paquets circulent dans un sous réseau les performances se dégradent, ce phénomène est appelé **congestion**.

### **Délai introduit par un ROUTEUR IP (mode datagramme)**

Soit  $\mu$  la capacité moyenne de traitement du routeur (paquets/s),  $\lambda$  le taux d'arrivée moyen de paquets par seconde. Les processus sont supposés poissonien, c'est-à-dire :

$P_n(t) = (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n! =$  probabilité d'arrivée de n paquets pendant un intervalle de temps t.

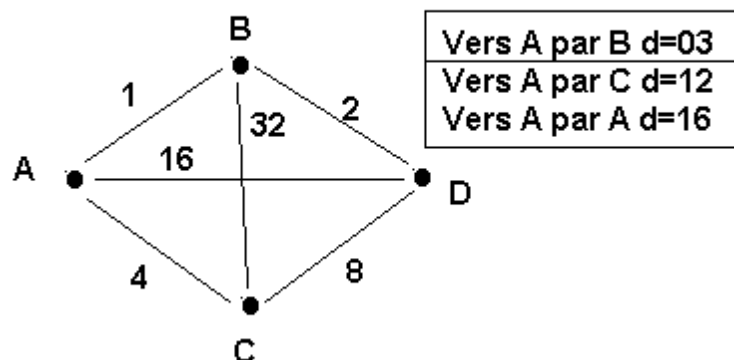
Alors le temps moyen de traversé du routeur s'écrit :  $T = 1/(\mu - \lambda)$

#### 9.4.1 Algorithme du plus court chemin.

Le réseau est représenté par un graphe. Chaque noeud est un **IMP** (**I**nterface **M**essage **P**rocessor), les lignes de communications constituent les arcs du graphe. Chaque arc est étiqueté avec une valeur analogue à la «distance» qui sépare deux noeuds adjacents.

**Remarque:** Pour un réseau de n noeuds, il existe au maximum  $C_n^2 = n(n-1)/2$  arcs, chaque IMP est relié à au plus n-1 autres IMP.

Chaque noeud mémorise dans une table la route la plus courte vers un noeud S sous forme du couple prochain noeud, distance au noeud source



#### 9.4.2 Routage multi chemin.

Chaque noeud gère une table de routage qui contient la liste des (p) routes possibles vers un noeud du réseau. Un algorithme (aléatoire par exemple) choisit une route parmi p.

#### 9.4.3 Routage Centralisé.

Le réseau comporte un Centre de Contrôle du Routage (RCC). Périodiquement chaque IMP envoie vers RCC diverses informations sur l'état de ses liens vers les noeuds adjacents. RCC établit en fonction de ces paramètres les tables de routage et actualise les ICMP.

#### 9.4.4 Routage Local.

Les IMP routent les paquets incidents en fonction de leurs seules informations, les algorithmes associés sont qualifiés de **routages adaptatifs locaux**.

L'algorithme de la *patate chaude* (hot potato) consiste à router dans le délai le plus court possible un paquet incident.

L'algorithme du **savoir différé** (backward learning) consiste à obtenir des informations sur les routes empruntées par les paquets incidents. Par exemple un compteur logé dans le paquet est incrémenté à chaque traversé d'un IMP.

#### 9.4.5 L'inondation.

Chaque paquet incident est diffusé sur toutes les lignes de communications, excepté la ligne d'arrivée.

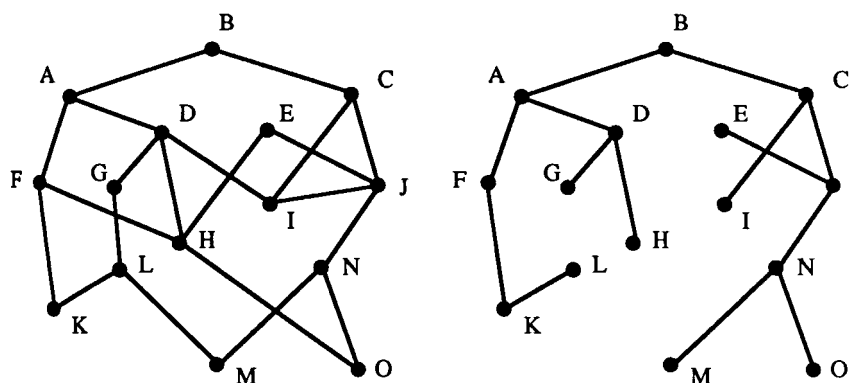
#### 9.4.6 Le routage distribué.

Chaque IMP échange périodiquement des informations de routage avec ses voisins. Cette technique était utilisée à l'origine dans ARPANET.

Par exemple chaque IMP gère une table qui contient les distances qui le sépare de des différents noeuds du réseau. Périodiquement chaque IMP envoie cette table à ces voisins.

#### 9.4.7 Routage optimal

L'ensemble des routes optimales qui mènent à une destination constitue un arbre (**arbre collecteur**) dont la racine est le noeud de destination.



Un arbre collecteur est obtenu par exemple à l'aide d'un algorithme du plus court chemin de Dijkstra.

#### 9.4.8 Routage par optimisation du flux.

On choisit la route pour laquelle le délai d'acheminement estimé du paquet est le plus faible possible.

**Remarque** soit  $\mu$  le nombre moyen de bits contenus dans un paquet,  $C$  la capacité de la ligne en bits/s,  $\lambda$  le taux d'arrivée de paquets par seconde (le processus étant supposé poissonien, c'est à dire

$$P_n(t) = (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n! = \text{probabilité d'arrivée de } n \text{ paquets pendant un intervalle de temps } t.$$

Alors le temps moyen de traversé de la ligne s'écrit :  $T = 1/(\mu C - \lambda)$

### 9.5 Contrôle de congestion.

#### 9.5.1 Pré allocation de tampons (buffer)

Un tampon est réservé (lors de la phase de connexion) dans l'IMP traversé.

#### 9.5.2 La destruction de paquets.

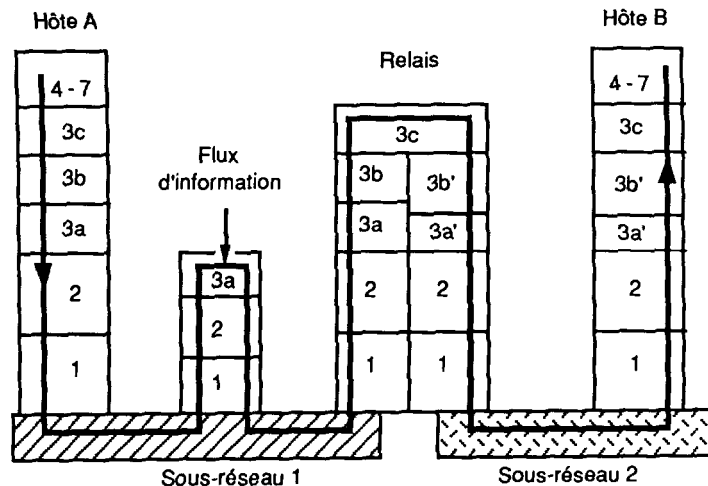
Un paquet qui ne peut pas être routé est détruit.



### 9.5.3 Les paquets d'engorgement

Lorsque le trafic d'une ligne dépasse un certain seuil un paquet d'engorgement est émis vers les nœuds qui émettent les paquets empruntant cette route. Les nœuds sources réduisent alors leur débit de x %.

### 9.6 Interconnexion de réseaux (au sens OSI)



L'interconnexion de réseau consiste à relier des Réseaux Locaux d'Entreprises (RLE ou LANs) et des Réseaux Longues Distances (RLD ou WAN). Cette interconnexion peut être réalisée au niveau de différentes couches de l'OSI.

- niveau physique (1) - les **répéteurs** recopient le flux d'information binaire, uniquement entre réseaux de même nature.
- niveau mac (2) - les **ponts (mac bridges)** répètent les trames entre RLE similaires ou différents.
- niveau réseau (3) - les passerelles (**gateway**) retransmettent les paquets après adaptation au RLE emprunté.
- niveau transport (4) - les **convertisseurs de protocoles** fournissent une interface au niveau supérieur

L'OSI divise la couche réseau en trois sous niveaux, adaptés aux besoins d'interconnexion :

- la sous couche d'accès au sous réseau 3a (*subnet access sublayer*), qui réalise le protocole spécifique au réseau utilisé.
- la sous couche de mise à niveau du sous réseau 3b (*subnet enhancement sublayer*), qui assure l'interface entre les différentes couches 3a.
- la sous couche d'interconnexion 3c (*internet sublayer*).

#### 9.6.1 Les répéteurs.

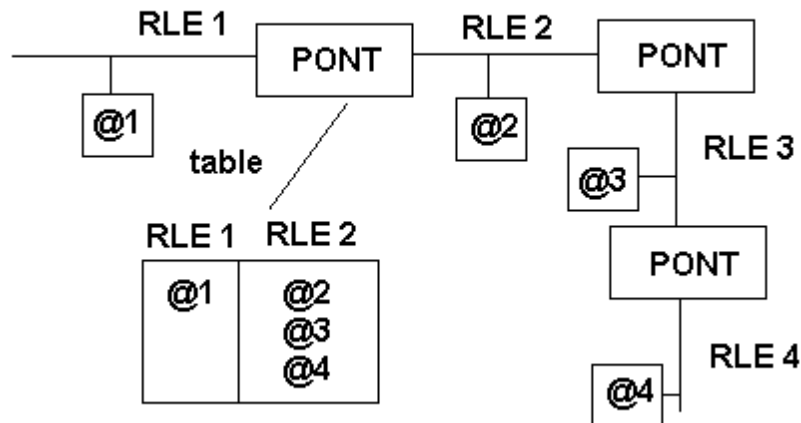
Par exemple ils seront utilisés lors d'un changement de média (câble coaxial - fibre optique).

## 9.6.2 Les ponts.

Ces éléments interconnectent deux LANs de natures différentes. Trois types problèmes à résoudre :

- différences de format de trames.
- différences de débit.
- différences de longueurs maximales de trames.

### 9.6.2.1 Les ponts transparents.



Le but des ponts transparents (*transparent bridges*) ou pont d'arbre recouvrant (*spanning tree bridge*) est l'interconnexion de RLE de la manière la plus simple possible. La norme IEEE 802.1d décrit ce type de mécanisme.

Chaque pont écoute toutes les trames d'un réseau RLE (il est dit en mode *promiscuous*). Une trame adressée à un élément d'un RLE distinct traverse le pont. Une table détermine en fonction de l'adresse destination de la trame si cette dernière doit franchir le pont.

A l'origine la table du pont est vide, les trames sont transmises par inondation. Le pont apprend les adresses des noeuds d'un RLE en mémorisant les adresses source des trames, cet algorithme est dit *backward learning*.

### 9.6.2.2 Le routage par contrôle de l'émetteur (source routing).

Si le noeud distant ne se trouve pas sur le RLE de l'émetteur, celui ci met à un le bit de poids fort de l'adresse et ajoute dans l'en tête de la trame la route complète à suivre.

## 9.6.3 Les passerelles.

Les passerelles opèrent au niveau de la couche réseau, leur performance est donc inférieure aux ponts.

### 9.6.3.1 Passerelles orientées connexions.

Une passerelle est organisée en deux demi-passerelles (chaque demi-passerelle comporte les sous couches 3a, 3b, 3c). Le protocole CCITT X25 est utilisé pour relier les deux demi passerelles.

### 9.6.3.2 Passerelles en mode non connecté (datagramme).

La passerelle est responsable du routage des paquets et de leur segmentation / réassemblage éventuel.

Dans la fragmentation dite transparente les paquets sont réassemblés par la passerelle puis segmentés si nécessaire.

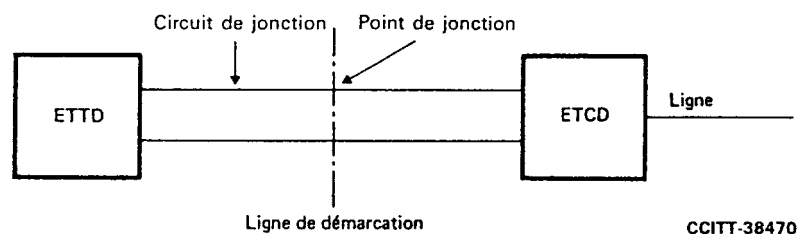
L'autre stratégie de fragmentation consiste à fragmenter les paquets dès que nécessaire. A l'arrivée la taille d'un paquet est inférieure à la plus petite taille des paquets des sous réseaux traversés.

## 9.7 Exemple de couche réseau

### 9.7.1 X25

X25 niveau 1 décrit les interfaces physiques et électriques. X25 niveau 2 assure les échanges entre ETTD et ETCD (correction des erreurs, LAPB ...).

X25 niveau 3 gère les connexions (*virtual call*) entre ETTD.



#### 9.7.1.1 Formats de paquets.

Les bits 8 à 5 du **1<sup>o</sup> octet** constituent l'identification générale du paquet

Paquet d'établissement de communication

Paquets de libération, contrôle de flux, interruption, réinitialisation, reprise,  
Enregistrement, diagnostic.

Paquets de données

Extension de l'identificateur général de format.

Les bits 4 à 1 du **1<sup>o</sup> octet** identifient le numéro de **groupe** de voies logiques

TABLEAU 16/X.25

## Identification générale de format

Identification générale de format		Octet 1 Éléments binaires			
		8	7	6	5
Paquets d'établissement de la communication	Numérotation modulo 8	0	X	0	1
	Numérotation modulo 128	0	X	1	0
Paquets de libération, de contrôle de flux, d'interruption, de réinitialisation, de reprise, d'enregistrement et de diagnostic	Numérotation modulo 8	0	0	0	1
	Numérotation modulo 128	0	0	1	0
Paquets de données	Numérotation modulo 8	X	X	0	1
	Numérotation modulo 128	X	X	1	0
Extension de l'identificateur général de format		0	0	1	1
Réservé à d'autres applications		*	*	0	0

Le **2<sup>o</sup> octet** désigne le numéro de **voie logique**. (sauf dans les paquets de reprise diagnostic et d'enregistrement).

L'ensemble **groupe + voie** constitue un numéro de circuit virtuel de 12 bits. Le numéro de CV d'un paquet émis est déterminé par l'ETTD. Le numéro de CV d'un paquet reçu est fixé par l'ETCD.

Le **3<sup>o</sup> octet** identifie le type du paquet.

Il existe six types de formats différents de paquets

TABLEAU 17/X.25

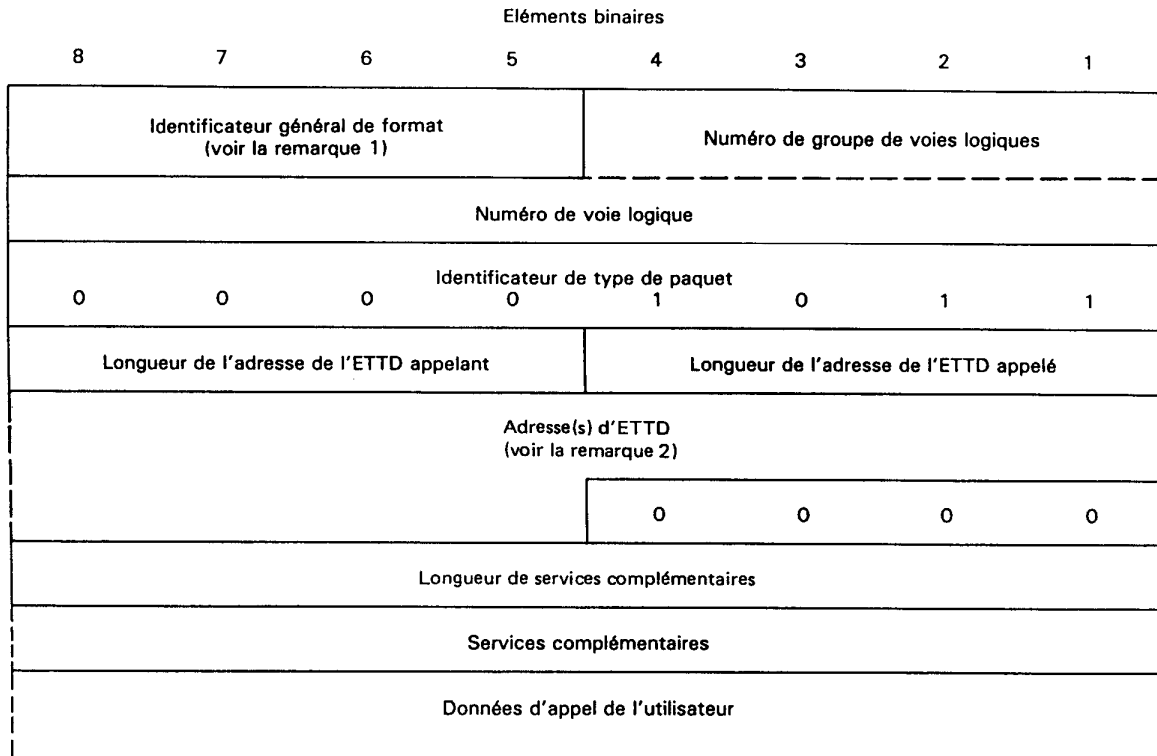
## Identification du type de paquet

Type de paquet		Octet 3 Éléments binaires							
de l'ETCD vers l'ETTD	de l'ETTD vers l'ETCD	8	7	6	5	4	3	2	1
<i>Etablissement et libération des communications</i>									
Appel entrant	Appel	0	0	0	0	1	0	1	1
Communication établie	Communication acceptée	0	0	0	0	1	1	1	1
Indication de libération	Demande de libération	0	0	0	1	0	0	1	1
Confirmation de libération par l'ETCD	Confirmation de libération par l'ETTD	0	0	0	1	0	1	1	1
<i>Données et interruption</i>									
Données de l'ETCD	Données de l'ETTD	X	X	X	X	X	X	X	0
Interruption par l'ETCD	Interruption par l'ETTD	0	0	1	0	0	0	1	1
Confirmation d'interruption par l'ETCD	Confirmation d'interruption par l'ETTD	0	0	1	0	0	1	1	1
<i>Contrôle de flux et réinitialisation</i>									
RR de l'ETCD (modulo 8)	RR de l'ETTD (modulo 8)	X	X	X	0	0	0	0	1
RR de l'ETCD (modulo 128) <sup>a1)</sup>	RR de l'ETTD (modulo 128) <sup>a1)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	1
RNR de l'ETCD (modulo 8)	RNR de l'ETTD (modulo 8)	X	X	X	0	0	1	0	1
RNR de l'ETCD (modulo 128) <sup>a1)</sup>	RNR de l'ETTD (modulo 128) <sup>a1)</sup>	0	0	0	0	0	1	0	1
	REJ de l'ETTD (modulo 8) <sup>a1)</sup>	X	X	X	0	1	0	0	1
	REJ de l'ETTD (modulo 128) <sup>a1)</sup>	0	0	0	0	1	0	0	1
Indication de réinitialisation	Demande de réinitialisation	0	0	0	1	1	0	1	1
Confirmation de réinitialisation par l'ETCD	Confirmation de réinitialisation par l'ETTD	0	0	0	1	1	1	1	1
<i>Reprise</i>									
Indication de reprise	Demande de reprise	1	1	1	1	1	0	1	1
Confirmation de reprise par l'ETCD	Confirmation de reprise par l'ETTD	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Diagnostic</i>									
Diagnostic <sup>a1)</sup>		1	1	1	1	0	0	0	1
<i>Enregistrement<sup>a1)</sup></i>									
	Demande d'enregistrement	1	1	1	1	0	0	1	1
Confirmation d'enregistrement		1	1	1	1	0	1	1	1

<sup>a1)</sup> N'est pas nécessairement disponible dans tous les réseaux.

Remarque – Un élément binaire noté «X» peut prendre la valeur 0 ou 1, comme indiqué dans le texte.

9.7.1.1.1 Paquets d'établissement et de libération de la communication.



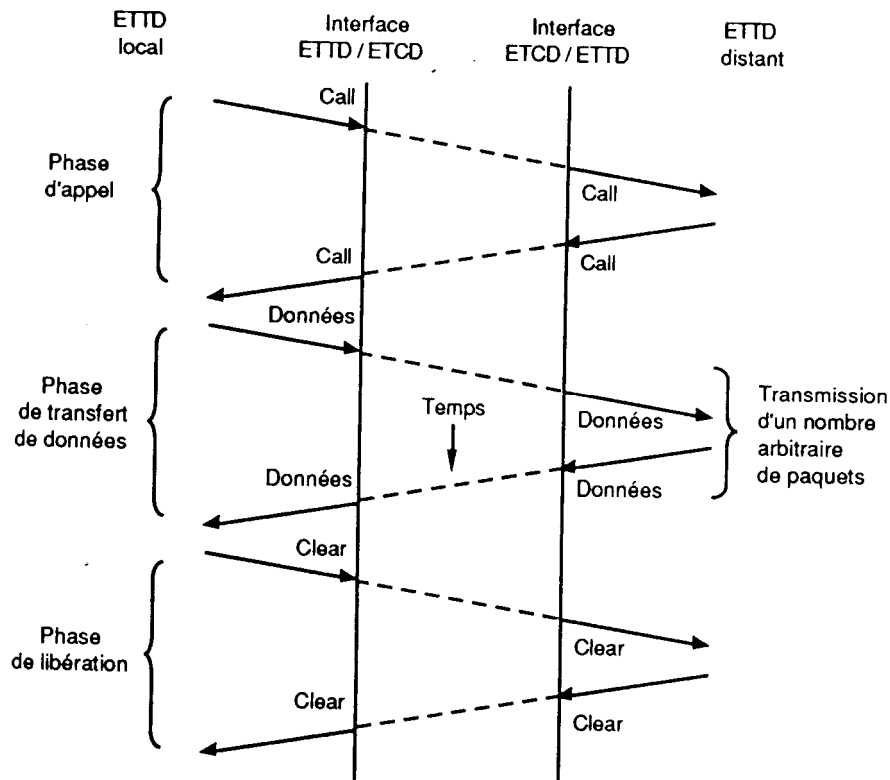
*Remarque 1* – Code 0X01 (modulo 8) ou 0X10 (modulo 128).

*Remarque 2* – La figure suppose que le nombre total de chiffres d'adresses présents est impair.

FIGURE 2/X.25

Format des paquets d'appel et d'appel entrant

Ils contiennent en particulier l'adresse de l'ETTD distant, c'est à dire une suite de chiffres décimaux codés en BCD (X121).



Une connexion X.25 comporte trois phases.

- **Phase d'appel.** Emission d'un paquet CALL REQUEST, le paquet CALL ACCEPTED est reçu en retour.
- **Phase de transfert de données:** émission réception de paquets de données.
- **Phase de libération:** Emission d'un paquet CLEAR REQUEST, le paquet CLEAR CONFIRMATION est reçu en retour.

### 9.7.1.1.2 Paquets de données et d'interruption.

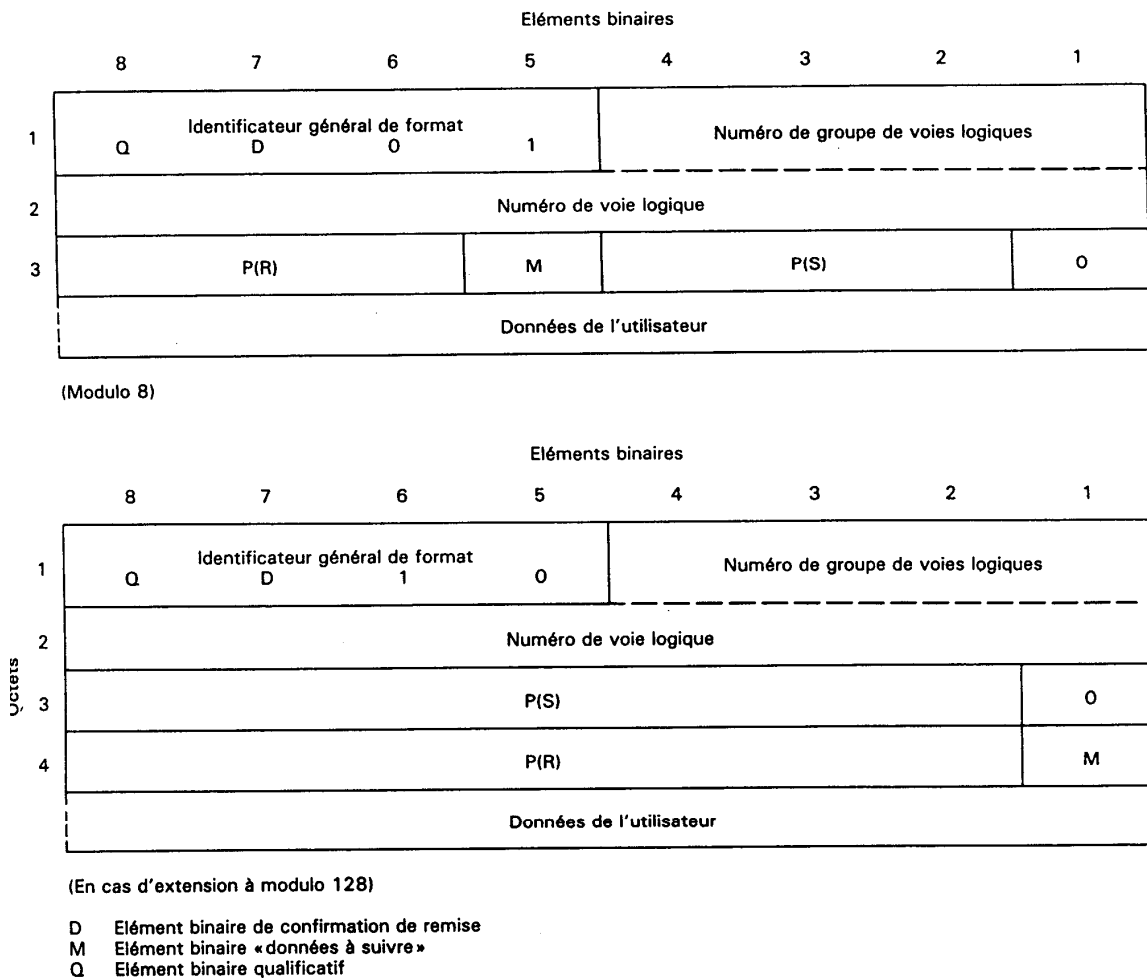


FIGURE 6/X.25

Format des paquets de données de l'ETTD ou de l'ETCD

Les séquences sont numérotées par un nombre de 3 bits, un bit M indique la dernière séquence d'un bloc de données, un bit D signifie la confirmation de remise.

### 9.7.1.1.3 Autres Paquets

- Paquets de contrôle de flux et de réinitialisation.
- Paquets de reprise.
- Paquets de diagnostics.
- Paquets nécessaires pour les services complémentaires.

## 9.8 Equivalence des services OSI et X25

Elle est établie par la norme **ISO 8878**.

### 9.8.1 IP

#### 9.8.1.1 Routage direct - délivrance immédiate.

Lorsque deux noeuds émetteurs et récepteurs sont connectés sur le même réseau physique, l'émetteur fabrique une trame IP et la délivre directement au récepteur.



### **9.8.1.2 Routage indirect.**

Lorsque l'émetteur et le récepteur n'appartiennent pas au même réseau, l'émetteur doit identifier la passerelle nécessaire.

Une passerelle comporte une **table de routage** à deux entrées, la première est l'adresse d'un réseau, la deuxième est l'adresse de la route (identifiant réseau en fait) qui conduit à la prochaine passerelle pour atteindre cette destination.

Lorsque la taille de la table de routage est petite on utilise la notion de **passerelle par défaut** à laquelle sont adressés les paquets dont on ne connaît pas la route à priori.

Bien que le routage soit basé sur la notion de réseaux, les passerelles peuvent associer des routes à des hôtes spécifiques (**host specific route**)

### **9.8.1.3 Algorithme de routage**

Extraire l'adresse IP de destination du datagramme **ID**.

Extraire l'adresse **IN** du réseau de destination de l'adresse ID.

Si le réseau IN est connecté à la passerelle, délivrer directement le paquet

Sinon si ID est associé à une route spécifique, envoyer la trame sur cette route.

Sinon si IN apparaît dans la table de routage, utiliser la route associée.

Sinon si une route par défaut existe, utiliser la route par défaut.

Sinon notifier une erreur de routage à la source du paquet.

## 9.9 Exemple d'un dialogue X25

L	PNTR	STA	FG	CH	CC	TYPE	S	RM	DATA							
1	00033	A—	10	01	0B	CALL			77	15	76	00	41	57	60	03
									00	02	00	00	00			
2	00059	—B	10	01	0F	CALAC			07	15	76	00	40	00		
3	00078	A—	10	01	0Q	DATA	0	0	06	E0	00	00	00	01	00	
4	00098	—B	10	01	21	RR		1								
5	00111	—B	10	01	20	DATA	0	1	06	D0	00	01	00	02	00	
6	00131	A—	10	01	22	RR										
7	00144	A—	10	01	22	DATA	1	1	02	F0	80	0D	48	01	2E	0A
									18	32	30	34	31	2D	31	35
									37	36	30	30	33	3D	70	64
									73	61	70	64	61	20	20	20
									20	0B	0E	38	33	2D	30	32
									2D	30	37	2D	31	30	3A	31
									32	0C	02	34	34	0B	01	01
									41	13	4A	01	01	4B	0E	9B
									31	20	4B	20	9B	32	20	4B
									20	9B	34	20	4C			
8	00234	—B	10	01	41	RR		2								
9	00247	—B	10	01	42	DATA	1	2	02	F0	80	0E	48	01	2E	09
									18	32	30	34	31	2D	31	35
									37	36	30	30	34	3D	50	44
									53	41	50	44	42	20	20	20
									20	0B	0E	38	33	2D	30	32
									2D	30	37	2D	31	30	3A	31
									32	0C	02	34	34	0B	01	01
									41	13	4A	01	01	4B	0E	9B
									31	20	4B	20	9B	32	20	4B
									20	9B	34	20	4C			
10	00337	A—	10	01	41	RR		2								
11	00350	A—	10	01	44	DATA	2	2	02	F0	80	09	03	11	01	01
12	00371	—B	10	01	61	RR		3								
13	00384	—B	10	01	64	DATA	2	3	02	F0	80	0A	00			
14	00402	A—	10	01	61	RR		3								
15	00415	A—	10	01	13	CLERQ			00							
16	00429	—B	10	01	17	CLECQ										

L	PNTR	STA	FG	CH	CC	TYPE	S	RM									
1	00057	—B	10	02	20	DATA	0	1	06	81	00	01	00	01	80	4B	
									33	36							
2	00079	A—	10	01	21	RR		1									
3	00092	A—	10	02	22	DATA	1	1	05	C0	00	00	00	01			
4	00141	A—	10	02	24	DATA	2	1	1A	E1	00	00	00	02	20	C2	
									04	44	49	4E	4B	C1	09	41	
									4D	53	34	45	52	44	41	4D	
									C0	01	07	4B	50	49	45	52	
									52	45	30	31	49	42	4D	30	
									31								
5	00196	—B	10	02	61	RR		3									
6	00207	—B	10	02	62	DATA	1	3	0C	D3	00	02	00	01	20	C2	
									04	44	49	4E	4F	4B	32	30	
7	00236	A—	10	02	41	RR		2									
8	00269	A—	10	02	46	DATA	3	2	04	F0	00	01	80				
9	00297	A—	10	02	48	DATA	4	2	04	F0	00	01	81	44	54	28	
									31	2C	31	30					
10	00323	—B	10	02	A1	RR		5									
11	00336	—B	10	02	A4	DATA	2	5	04	63	00	02	02	04	F0	00	
									02	80	44	3C	3C	30	30	30	
									31	3E	3E	30	20				
12	00369	A—	10	02	61	RR		3									
13	00382	A—	10	02	6A	DATA	5	3	04	61	00	01	01				
14	00410	A—	10	02	62	DATA	6	3	04	F0	00	01	82	30	30	30	
									36	20	3D	53	45	51	55	45	
									20	48	42	2E					
15	00447	—B	10	02	E1	RR		7									
16	00462	A—	10	02	6E	DATA	7	3	04	F0	00	01	83	44	54	20	
									31	20	31	30					
17	00495	—B	10	02	06	DATA	3	0	04	63	00	02	04	04	F0	00	
									02	81	44	3C	3C	30	30	31	
									3E	3E	20	20					
18	00528	A—	10	02	81	RR		4									
19	00541	A—	10	02	80	DATA	0	4	04	61	00	01	02				
20	00569	A—	10	02	82	DATA	1	4	04	F0	00	01	84	44	54	20	
									31	2C	31	30					
21	00595	—B	10	02	41	RR		2									

## 9.10 Arbre réducteur

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>

#define NBR_NOEUDS 8
#define INFINI 1000
#define INCONNU -1
#define VRAI 1
#define FAUX 0

typedef struct { int nb          ;
                int d           ;
                int n[NBR_NOEUDS] ;
                } ROUTE ;
typedef struct { int nb          ;
                int pre[NBR_NOEUDS] ;
                int n[NBR_NOEUDS] ;
                } LIGNE ;

char lib[NBR_NOEUDS][2] = {"A","B","C","D","E","F","G","H"};
ROUTE r[NBR_NOEUDS][NBR_NOEUDS] ;
LIGNE arbre[NBR_NOEUDS] ;
int narbre ;
/* matrice de connexion a(i,j), i==ligne, j==colonne */
int a[NBR_NOEUDS][NBR_NOEUDS] = {
    /* a b c d e f g h */
    -1, 2, 0, 0, 0, 0, 6, 0, /* a */
    -1,-1, 7, 0, 2, 0, 0, 0, /* b */
    -1,-1,-1, 3, 0, 3, 0, 0, /* c */
    -1,-1,-1,-1, 0, 0, 0, 2, /* d */
    -1,-1,-1,-1,-1, 2, 1, 0, /* e */
    -1,-1,-1,-1,-1,-1, 0, 2, /* f */
    -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1, 4, /* g */
    -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1 /* h */
};

int route(int nsource);

main()
{ route(0) ;
  route(4) ;
  return(0);
}

int route(int nsource)
{ int i,j,ndest,l,min,kmin,nact,hop,inserta ;
  int pre[NBR_NOEUDS] ;
  int d[NBR_NOEUDS] ;
  int eval[NBR_NOEUDS] ;

  for(i=0;i<NBR_NOEUDS;i++)
  { a[i][i] = 0;
    for(j=0;j<i;j++)
      a[i][j] = a[j][i] ;
  }

  for(i=0;i<NBR_NOEUDS;i++)
  { for(j=0;j<NBR_NOEUDS;j++) printf("%01d ",a[i][j]);
    printf("\n");
  }
}
```

```

for(ndest=0;ndest<NBR_NOEUDS;ndest++)
{
    if (ndest == nsource) ;

    else
    {
        for(i=0;i<NBR_NOEUDS;i++)
        {
            d[i] = INFINI ;
            pre[i] = INCONNU ;
            eval[i] = FAUX ;
        }

        d[nsource] = 0 ;
        eval[nsource] = VRAI ;
        nact = nsource ;

        while(nact != ndest)
        {
            for(i=0;i<NBR_NOEUDS;i++)
            {
                if (a[nact][i] != 0) /* un lien existe entre nact et i */
                {
                    if (eval[i] == FAUX) /* i est un noeud non ,valu, */
                    {
                        l = d[nact] + a[nact][i] ; /* chemin passant par nact */
                        if (l < d[i]) /* meilleur choix */
                        {
                            d[i] = l ; pre[i]=nact ; }
                    }
                }
            }
        }
        min = INFINI ; /* recherche le la distance minimale */
        for(i=0;i<NBR_NOEUDS;i++)
        {
            if ((eval[i] == FAUX) && (d[i] < min) )
            {
                min = d[i] ; kmin = i ; }
        }

        if (min == INFINI)
        {
            printf("Erreur, le graphe n'est pas connexe\n") ;
            exit(0);
        }

        eval[kmin] = VRAI ;
        nact = kmin ;
        printf("%s->%s, n=%s, d=%d\n",lib[nsource],lib[ndest],lib[nact],d[nact]);
    }

    /*****
    /* determine le nombre de hops */
    /*****/
    nact = ndest ;
    hop=0;
    while(nact != nsource)
    { nact = pre[nact] ; hop++;}

    /*****
    /* determine la route */
    /*****/
    r[nsource][ndest].nb = hop+1 ;
    nact = ndest ;
    r[nsource][ndest].d = d[ndest] ;
    for(i=hop;i>=0;i--)
    {
        r[nsource][ndest].n[i] = nact ;
        nact = pre[nact] ;
    }

    /*****
    /* affiche la route */

```

```

/*****/
for(i=0;i<r[nsource][ndest].nb;i++)
printf("%s ",lib[r[nsource][ndest].n[i]]);
printf("\n");
}
/*****/
} /* autre recherche */
/*****/

/*****/
/* arbre collecteur */
/*****/
for(i=0;i<NBR_NOEUDS;i++) arbre[i].nb = 0;
narbre=1;
arbre[0].nb      = 1      ;
arbre[0].n[0]    = nsouce ;
arbre[0].pre[0] = nsouce ;

for(ndest=0;ndest<NBR_NOEUDS;ndest++)
{ if (ndest==nsouce) ;
  else
  { if (narbre < r[nsource][ndest].nb) narbre = r[nsource][ndest].nb ;
    for(i=1;i<r[nsource][ndest].nb;i++)
    { inserta = VRAI ;
      for(j=0;j<arbre[i].nb;j++)
      { if (arbre[i].n[j] == r[nsource][ndest].n[i])
        inserta = FAUX ;
      }
      if (inserta) {   arbre[i].n[arbre[i].nb] = r[nsource][ndest].n[i]
;
                          arbre[i].pre[arbre[i].nb] = r[nsource][ndest].n[i-1] ;
                          arbre[i].nb +=1 ;
                        }
    }
  }
}
/*****/
/* affichage des routes */
/*****/

printf("\n");
for(ndest=0;ndest<NBR_NOEUDS;ndest++)
{ if (ndest == nsouce) ;
  else
  { printf("[distance= %02d] ",r[nsource][ndest].d);
    for(i=0;i<r[nsource][ndest].nb;i++)
    printf("%s ",lib[r[nsource][ndest].n[i]]);
    printf("\n");
  }
}

/*****/
/* affichage de l'arbre collecteur */
/*****/

for(i=0;i<narbre;i++)
{ if (arbre[i].nb != 0)
  { printf("rang%d ",i+1);
    for(j=0;j<arbre[i].nb;j++)
    printf("%s (fils de %s) ",lib[arbre[i].n[j]],lib[arbre[i].pre[j]]);
    printf("\n");
  }
}

return(0);

```

}