

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Polycopié de Cours

Réseaux Haut-débits

Présenté par :

MOULAY Mohammed

Ce cours est destiné aux étudiants de 1 ère année Master en
télécommunication spécialité: *Réseaux et Télécommunications*

Algérie
2018

Avant Propos

Les hauts débits de demain, qui seront les bas débits d'après-demain, ne pourront être obtenus qu'avec de nouvelles infrastructures qui mélangeront probablement, suivant l'environnement rural ou urbain, des fibres optiques et des transmissions sans fil. Parallèlement, les protocoles développés par les informaticiens de l'Internet ont la vie dure : IP, TCP, et toute la gamme des protocoles applicatifs contrôlant l'échange d'information (HTTP, FTP, SMTP...) ont peu changé. Les évolutions se retrouvent plutôt au niveau des contenus (pages dynamiques, animations, vidéo en ligne...) et de la sécurité (antivirus, paiement en ligne...).

Dans le monde filaire, la technologie Ethernet a acquis une situation de quasi-monopole avec des débits sans cesse augmentés (1 Gbit/s aujourd'hui, 100 Gbit/s demain) sur des câblages en paire torsadée peu onéreux. Le sans fil et l'avènement du WiFi avec ses évolutions constantes (802.11n, 802.11ad...) propose aux entreprises et aux particuliers des performances satisfaisantes (jusqu'à 500 Mbit/s) dans les lieux où le câblage est difficile.

Cette progression spectaculaire s'appuie sur des avancées technologiques décisives dans deux domaines : celui des supports physiques des télécommunications, d'une part (fibre optique, canaux hertziens ou infrarouges, composants hyperfréquences, hybrides ou optoélectronique), et celui des supports logiques d'autre part, l'architecture et les protocoles nécessaires pour maîtriser de tels débits et y intégrer des flux de caractéristiques aussi différentes que la voix, les données ou la vidéo.

Le début de ce siècle est marqué par une évolution considérable des techniques, or certaines technologies, qui peuvent paraître vieillissantes à certains, sont encore très présentes dans les entreprises. De plus, elles constituent bien souvent le fondement des techniques actuelles et c'est volontairement qu'on a maintenu dans ce cours une étude succincte des technologies propriétaires, des réseaux X.25, des réseaux métropolitains et les LAN, ATM...

Les techniques d'actualité font toutes l'objet d'une étude appropriée, en particulier les réseaux sans fils, la boucle locale et ADSL, MPLS, les VLAN et les VPN.

Ce cours a pour but de vous présenter de manière pédagogique les différents concepts et technologies de télécommunications en perpétuelle évolution. Il s'adresse à des étudiants en 1ère année Master télécommunication afin d'acquérir des connaissances dans le domaine.

Mascara, le 25 octobre 2018

Table des matières

Avant Propos	i
Résumé	vi
Mots-clés	vi
Notations et Abréviations	vii
Introduction	9
Chapitre 1 Modélisation Hiérarchique du Réseau	11
1.1 GÉNÉRALITÉS	11
1.1.1 Définitions	11
1.1.2. Classification des réseaux	12
1.1.3. Topologies physiques des réseaux	13
1.2. Conception d'une architecture commutée	15
1.3. Avantages d'une architecture hiérarchique	18
1.4. Les Types de commutation	18
1.4.1. Commutation de circuits	18
1.4.2. Commutation de messages	20
1.4.3. La commutation de paquets	21
a) le service en mode connexion ou circuit virtuel	22
b) Systèmes sans connexion (IP) ou datagramme	22
1.4.4. La commutation de cellule (Muxage par étiquette)	22
Chapitre 2 Réseaux Métropolitains	24
2.1 FDDI (Fiber Distributed Data Interface=interface de données distribuée en fibre)	24
2.1.1. Caractéristiques des réseaux FDDI	25
2.2. DQDB (Distributed Queue Dual Bus= distribué à double bus)	26
2.3. L'ANNEAU À JETON (Token Ring), IEEE 802.5	27
2.3.1. Généralités	27

2.3.2. Principe général du jeton sur anneau	28
2.4. Ethernet	30
2.4.1. Normes et débits sur Ethernet	23
a) La connectique	23
2.4.2 Ethernet IEEE 802.3 de première génération	31
a) L'Ethernet épais, IEEE 802.3 10Base5	31
b) L'Ethernet fin, IEEE 802.3 10Base2.....	32
c) L'Ethernet sur paires torsadées, IEEE 802.3 10BaseT.....	33
2.4.3. Le Fast Ethernet 100 Mbit/s.....	34
2.4.4. Le Gigabit Ethernet	35
2.4.5. Le 10 Gigabit Ethernet	36
Chapitre 3	Les réseaux de transport
	37
3.1 LE PLAN DE TRANSMISSION.....	37
3.1.1. La hiérarchie plésiochrone (PDH).....	38
a) La trame de base du système européen	39
b) La trame de base du système américain	40
3.1.2. La technologie SDH.....	41
a) La hiérarchie synchrone (SDH).....	41
b) Les équipements SDH	43
3.2. LE PLAN DE SERVICE	45
3.2.1. Le protocole X.25.....	47
a) Le niveau X.25-1.....	48
b) Le niveau X.25-2.....	49
c) Le niveau X.25-3	50
3.2.3. LE RELAIS DE TRAME OU FRAME RELAY	52
a) trame Frame Relay.....	48
3.2.4. LE RNIS	54
3.2.5 Le réseau ATM.....	56
3.2.5.1 Principe.....	56
3.2.5.2 Architecture.....	57
3.2.5.3 La couche ATM	58

a) <i>Structure des cellules</i>	58
b) <i>Fonctions de la couche ATM</i>	58
3.2.5.4 <i>Connexions ATM</i>	59
a) <i>Principe de la connexion virtuelle</i>	59
b) <i>Translation des valeurs de VCI</i>	60
c) <i>Le conduit virtuel</i>	61
d) <i>Commutation à deux niveaux</i>	62
3.2.6. <i>MPLS</i>	62
3.2.7. <i>La technologie WDM/DWDM</i>	64
3.3 <i>L'ACCÈS AUX RÉSEAUX, LA BOUCLE LOCALE</i>	66
3.3.1. <i>Organisation de la distribution des accès</i>	67
3.3.2. <i>L'accès aux réseaux par liaison dédiée (ligne spécialisée)</i>	68
3.3.3. <i>La Boucle locale radio (BLR)</i>	69
Chapitre 4 <i>La Solution Haut débit</i>	71
4.1. <i>Les technologies DSL</i>	71
4.1.1. <i>Le modem ADSL</i>	72
4.1.2. <i>Les DSLAM (DSL Access Module)</i>	73
4.1.3. <i>Les protocoles de l'ADSL</i>	73
4.2. <i>La fibre optique</i>	76
4.2.1. <i>PON</i>	76
4.3. <i>Les réseaux locaux sans fil</i>	77
4.3.1 <i>L'architecture SANS FIL 802.11 (WiFi)</i>	78
4.3.2. <i>WiMAX (IEEE802.16)</i>	80
4.4. <i>Réseaux mobiles</i>	82
4.4.1. <i>Les trois générations de réseaux de mobiles</i>	83
4.4.1.1. <i>Le réseau GSM</i>	83
a) <i>Architecture</i>	83
4.4.1.2. <i>La 3G et l'UMTS</i>	85
b) <i>Architecture</i>	86
4.4.1.3. <i>La 4G et le LTE</i>	87
a) <i>Caractéristiques</i>	87

4.5. Les systèmes satellite large bande	87
Chapitre 5 Tunneling Protocol	88
5.1. Les protocoles de liaison de données	88
5.1.1. Le protocole HDLC (High-Level Data Link Control)	88
5.1.1.1 STRUCTURE D'UNE TRAME HDLC	88
5.1.1.2. Fonctionnement d'HDLC	90
a) Établissement et rupture de connexion	90
b) L'échange des données	91
d) Gestion des temporisations	92
e) Gestion des erreurs	93
5.1.1.3. Les différentes versions du protocole HDLC	94
5.1.1.4. Conclusion	95
5.2. PPP, Point to Point Protocol et PPP over Internet	95
5.2.1. Conclusion	97
5.3. Le protocole L2TP	97
5.4. VPN	98
5.4. IPsec (IP sécurisé)	101
Bibliographie	48

Résumé

Un réseau peut être vu comme un ensemble de ressources mises en place pour offrir un ensemble de services. C'est l'évolution des services et des trafics qui en découlent qui a piloté, dans les dernières années, l'évolution technologique qui a permis d'augmenter la capacité et les fonctionnalités des ressources des réseaux. Le réseau de transmission fournit les capacités de transport des flux voix, vidéo, données générés par les réseaux de commutation : IP, ATM, Frame Relay, RTC, MPLS, GSM, etc. plusieurs technologies sont considérées pour la transmission : PDH, SDH et D-WDM.

Dans la première partie nous allons présenter les différentes hiérarchies des réseaux de commutation et nous évoquerons par suite l'évolution des technologies Ethernet, FDDI et DQDB. Ensuite, nous traitons des réseaux d'accès. Nous présentons les technologies xDSL, BLR et satellite. la partie qui suit est dédiée aux technologies de cœur de réseau. Nous introduisons l'IP sur ATM, le MPLS et les technologies tout optiques. On traite également des réseaux métropolitains, de plus en plus présents entre l'accès et le backbone. Les dernières parties traitent des évolutions des réseaux mobiles vers les générations 2.5 et 3. ainsi que les différents protocoles HDLC, PPPoE et les réseaux VPN et IPsec.

Mots-clés : Ethernet IEEE 802.3, Gigabit Ethernet, Token-Ring, FDDI IEEE802.8, DQDB -IEEE 802.6, RNIS, MPLS, DWDM, ATM, Frame Relay, lignes Louées, X25, WiFi, WiMAX, GSM, UMTS, LTE, VSAT, VPN, PPPoE, HDLC.

Notations et Abréviations

AAL <i>ATM Adaptation Layer</i>	DSA <i>Distributed System Architecture</i>
ABM <i>Asynchronous Balanced Mode</i>	DSAP <i>Destination Service Access Point</i>
Ack <i>Acknowledge</i>	DSL <i>Digital Subscriber Line</i>
ADSL <i>Asymmetric Data Subscriber Line</i>	DTE <i>Data Terminal Equipment</i>
AMRT <i>Accès Multiple à Répartition dans le Temps</i>	DTP <i>Distributed Transaction Processing</i>
ANSI <i>American National Standard Institute</i>	DWDM <i>Dense WDM</i>
AP <i>Application Process</i>	EA <i>End Address</i>
ARM <i>Asynchronous Response Mode</i>	EB <i>Elasticity buffer</i>
ARP <i>Address Resolution Protocol</i>	EIR <i>Excess Information Rate</i>
ART <i>Autorité de Régulation des Télécommunication</i>	ELAN <i>Emulated LAN</i>
ASCE <i>Association Control Service Element</i>	ES <i>End System</i>
ASCII <i>American Standard Code for Information Interchange</i>	ETCD <i>Equipement Terminal de Circuit de Données</i>
ATM <i>Asynchronous Transfer Mode</i>	ETR <i>Early Token Release</i>
B-ISDN <i>Broadband Integrated Service Digital Network</i>	ETTD <i>Equipement Terminal de Traitement de Données</i>
BEB <i>Binary Exponentiel Backoff</i>	FCS <i>Fibre Channel Standard</i>
BLR <i>Boucle Locale Radio</i>	FCS <i>Frame Check Sequence</i>
BSC <i>Binary Synchronous Communication</i>	FDDI <i>Fiber Distributed Data Interface</i>
BSS <i>Basic Synchronized Subset</i>	FDM <i>Frequency Division Multiplexing</i>
CATV <i>Cable TéléVision</i>	FDSE <i>Full Duplex Switched Ethernet</i>
CCITT <i>Comité Consultatif International pour le Télégraphe et le Téléphone</i>	FLP <i>Fast Link Pulse</i>
CER <i>Cell Error Ratio</i>	FR <i>Frame Relay (relais de trames)</i>
CRC <i>Cyclic Redundancy Check</i>	FRAD <i>Frame Relay Access Device</i>
CSMA <i>Carrier Send Multiple Access</i>	FSK <i>Frequency Shift Keying</i>
CTD <i>Cell Transfert Delay</i>	FTP <i>File Transfer Protocol</i>
CV <i>Circuit Virtuel</i>	FTP <i>Foiled Twisted Pair</i>
CVC <i>Circuit Virtuel Commuté</i>	GFA <i>Groupe Fermé d'Abonnés</i>
CVP <i>Circuit Virtuel Permanent</i>	GMPLS <i>Generalized MPLS</i>
DAS <i>Double Attachment Station</i>	GPRS <i>General Packet Radio Services</i>
DBR <i>Deterministic Bit Rate</i>	GPS <i>Global Positioning System</i>
DCB <i>Décimal Codé Binaire</i>	GSM <i>Global System for Mobile communications</i>
DCE <i>Data Circuit Equipment</i>	GSMP <i>General Switch Management Protocol</i>
DDCMP <i>Digital Data Communication Message Protocol</i>	HDBn <i>Haute Densité Binaire d'ordre n</i>
DE <i>Discard Eligibility</i>	HDLC <i>High Level Data Link Protocol</i>
DECT <i>Digital Enhanced Cordless Telephone</i>	HDSL <i>High data rate DSL</i>
DF <i>Do not Fragment</i>	HEC <i>Header Error Control</i>
DHCP <i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>	HEL <i>Header Extension Length</i>
NIC <i>Data Network Identification Code</i>	HSTRA <i>High Speed Token Ring Alliance</i>
DNS <i>Domain Name System</i>	HTTP <i>Hyper Text Transfer Protocol</i>
DPAM <i>Demand Priority Access Method</i>	IAB <i>Internet Activities Board</i>
DQDB <i>Distributed Queue Dual Bus</i>	ICF <i>Isochronous Convergence Function</i>
DS <i>Directory Service</i>	ICMP <i>Internet Control and error Message Protocol</i>
	ICS <i>IBM Cabling System</i>
	IEEE <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
	IFG <i>InterFrame Gap</i>
	IKE <i>Internet Key Exchange</i>
	IP <i>Internet Protocol</i>

IPBX *Internet Protocol private Branch eXchange*
IPsec *IP Security*
ISDN *Integrated Services Digital Network*
ISO *International Standardization Organization*
IT *Intervalle de Temps*
JPEG *Joint Photographic Experts Group*
JTM *Job Transfer and Manipulation*
LAN *Local Area Network*
LASER *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
LDP *Label Distribution Protocol*
LEC *LAN Emulation Client*
LEC-ID *LEC-Identifier*
LECS *LAN Emulation Configuration Server*
LL *Liaison Louée*
LLC *Logical Link Control*

LPDU *Link Protocol Data Unit*
LS *Liaison Spécialisée*
LSAP *Link Service Access Point*
LSDU *Link Service Data Unit*
LSP *Label Switched Path*
LSR *Label Switched Router*
LTP *Link Test Pulses*
MAC *Medium Access Control*
MACF *Multiple Association Control Function*
MAN *Metropolitain Area Network*
MAU *Medium Access Unit*
MIC *Modulation par Impulsion et Codage*
MPEG *Motion Picture Expert Group*
MPLS *MultiProtocol Label Switching*
MPOA *MultiProtocol Over ATM*
NRZ *Non Return to Zero*
NRZI *No Return to Zero Inverted*
OSI *Open System Interconnection*
OXC *Optical Cross Connect*
PABX *PrivAte Branch eXchange*
PAD *Packet Assembler Disassembler*
PAF *Pre-Arbitrated Function*
PBX *Private Branch eXchange*
PCI *Protocol Control Information*
PCM *Pulse Code Modulation*
PDH *Plesiochronous Digital Hierarchy*

PDU *Protocol Data Unit*
PID *Protocol ID*
PMD *Physical Medium Dependent*
PMI *Physical Medium Independent*
PNNI *Private Network to Network Interface*
POH *Path OverHead*
PPP *Point to Point Protocol*
PSK *Phase Shift Keying*
PTI *Payload Type Identifier*
PVC *Permanent Virtual Circuit*

QoS *Quality of Service*
QPSX *Queue Packet Dual Bus*
RNIS *Réseau Numérique à Intégration de Service*

RNIS-LB *RNIS Large Bande*
RTC *Réseau Téléphonique Commuté*
SAAL *Signaling AAL*
SALL *Signaling AAL*
SDH *Synchronous Digital Hierarchy*
SDU *Service Data Unit*
SF *SuperFrame*
SFD *Start Frame Delimitator*
SIM *Subscriber Identification Module*
SOH *Section OverHead*
SONET *Synchronous Optical NETwork*
SSL *Secure Socket Layer*
STM *Synchronous Transfer Mode*
STP *Shielded Twisted Pairs*
SVC *Switched Virtual Circuit*
TC *Transmission Convergence*
TCP *Transmission Control Protocol*
TDM *Time Division Multiplexing*
THT *Token Holding Timer*
TRT *Token Rotation Timer*
TTI *Taux de Transfert des Informations*
TTL *Time To Live*
UDP *User Datagram Protocol*
UE *User Element*
UI *Unnumbered Information*
UIT *Union Internationale des Télécommunications*
UMTS *Universal Mobile Telecommunication System*
URAD *Unité de Raccordement d'Abonnés Déportés*
URL *Uniform Ressource Locator*
UTP *Unshielded Twisted Pairs*
VC *Virtual Connection*
VC *Virtual Contener*
VCC *Virtual Channel Connection*
VCI *Virtual Channel Identifier*
VIP *Visual Information Protocol*
VL *Voie Logique*
VLAN *Virtual Local Aera Network*
VoD *Video on Demand*
VPI *Virtual Path Identifier*
VPN *Virtual Private Network*
VR *Virtual Route*
VRC *Vertical Redundancy Check*
VT *Virtual Terminal*
VTOA *Voice and Telephony Over ATM*
WAN *Wide Area Network*
WAP *Wireless Application Protocol*
WDM *Wavelength Division Mode*
WWW *World Wide Web*
XID *eXchange IDentification command*

Introduction

Le domaine des Télécommunications et des Réseaux est en pleine effervescence, chaque semaine qui s'écoule apporte sa moisson de nouvelles offres, d'annonces et de propositions de norme. Confronté à ce flux incessant de nouveautés, le praticien doit faire des choix qui s'avéreront stratégiques pour l'entreprise et structurants pour l'avenir de son système d'information.

C'est dire l'importance de disposer de bases solides, seules aptes à évaluer sagement la pertinence des solutions proposées par les constructeurs de matériels et les éditeurs de logiciels.

Les réseaux informatiques sont devenus incontournables aujourd'hui. Ils sont employés dans toutes les entreprises et même chez les particuliers. Ils permettent de mettre en œuvre des applications très diverses, des plus simples aux plus sophistiquées. La plus connue est la navigation sur le Web, c'est-à-dire le partage d'informations grâce à Internet. Qu'il s'agisse de réseaux locaux, de réseaux sans fil, de réseaux d'opérateurs ou de petits réseaux privés, ils obéissent tous à des principes de structuration qu'il est indispensable de comprendre. Ils utilisent une architecture en couches, dans laquelle la communication entre ordinateurs obéit à des règles précises définies par des protocoles de communication. Les protocoles les plus connus sont TCP et IP, ils ont donné leur nom à l'architecture TCP/IP.

L'évolution rapide des réseaux de télécommunications est généralement guidée par deux facteurs principaux: l'augmentation du trafic Internet et les progrès technologiques dans les systèmes de télécommunications. Au cours des deux dernières décennies, nous avons été témoins d'une croissance phénoménale de la demande Internet due principalement à l'émergence de nouvelles applications Internet temps réel telles que la vidéo-conférence, la téléphonie IP, le commerce électronique, la diffusion TV HD, les jeux interactifs, etc. Cette croissance de la demande de la bande passante ne cesse à devenir de plus en plus considérable et impressionnante. Même une évaluation conservatrice de la croissance du trafic Internet prévoit encore une augmentation importante pour les années à venir. Tout cela a stimulé automatiquement la nécessité d'accroître la capacité de la bande passante des réseaux de transport. Afin de faire face à cette nouvelle tendance, les opérateurs ont adopté un déploiement à grande échelle des systèmes de transmission à haut débit comme SDH (Synchronous Digital Hierarchy), WDM (Wavelength Division Multiplexing) et DWDM (Dense WDM).

l'organisation du cours est la suivante: Le Chapitre 1 présente Les concepts généraux des réseaux, Il détaille les différentes solutions de commutation mises en place ainsi que Les architectures de communication.

le second chapitre est dédié à l'étude des réseaux Métropolitains on a abordé l'architecture et le format de donner des deux réseaux FDDI et DQDB ainsi que leurs fonctionnement général.

Le Chapitre 3 présente les principes, le fonctionnement, les évolutions et les limitations des réseaux de transport sur les trois plans de transmission (PDH, SDH, WDM/DWDM), de service (X25, Frame Relay, ATM, et les réseaux d'opérateurs RNIS, MPLS) et l'accès aux réseaux (BLR,...) depuis leur apparition.

On présente dans le quatrième chapitre des techniques de la solution haut débit. Dans un second temps, nous présentons les différentes technologies cellulaires.

Le Chapitre 5 traite les différents protocoles HDLC, PPP et PPPoE et L2TP ainsi que les réseaux privés virtuels VPN et IPsec (Internet Protocol Security).

1.1 GÉNÉRALITÉS

1.1.1 Définitions

Un réseau est un ensemble de moyens matériels et logiciels géographiquement dispersés destinés à offrir un service, comme le réseau téléphonique, ou à assurer le transport de données. Les techniques à mettre en œuvre diffèrent en fonction des finalités du réseau et de la qualité de service désirée.

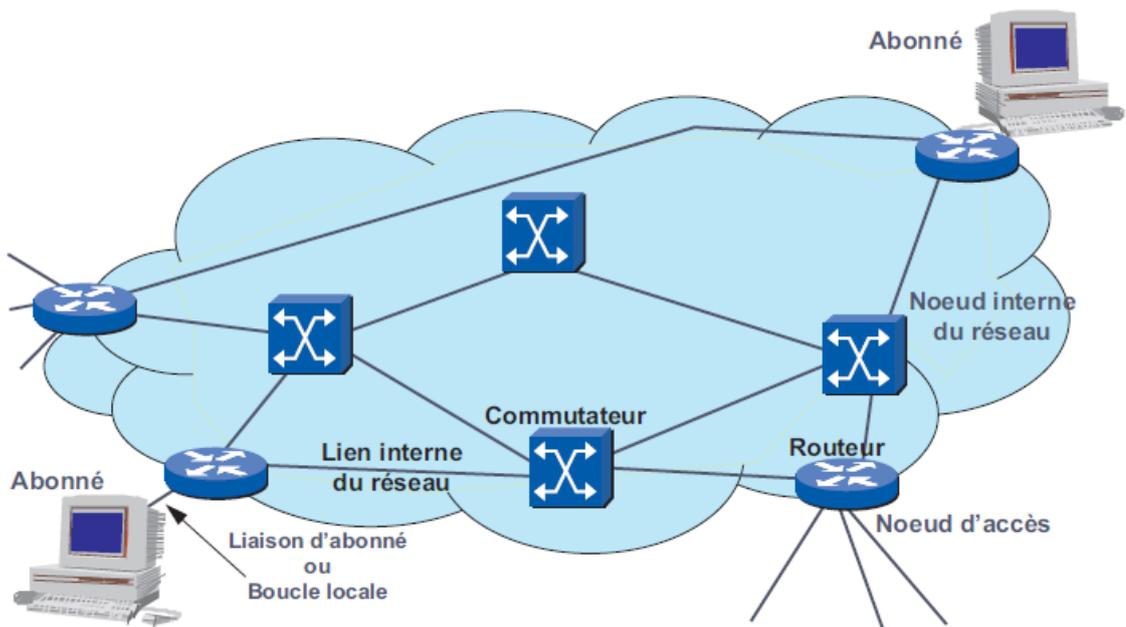


Figure 1.1. Le réseau : ensemble de ressources mises en commun.

Le réseau illustré par la figure 1.1 est composé de nœuds. Les nœuds d'accès, situés à la périphérie du réseau, permettent le raccordement des usagers par une liaison dénommée liaison d'abonné. L'ensemble des moyens mis en œuvre pour raccorder un usager est souvent désigné par le terme de boucle locale1(

Pour certains la boucle locale ne comprend que la liaison cuivre qui relie l'abonné au **PoP** (Point of Présence).. Les nœuds sont généralement des routeurs au point d'accès et des commutateurs au cœur du réseau.

1.1.2. Classification des réseaux

Les réseaux informatiques sont nés du besoin de relier des terminaux distants à un site central puis des ordinateurs entre eux et enfin des machines terminales, telles que stations de travail ou serveurs. Dans un premier temps, ces communications étaient destinées au transport des données informatiques. Aujourd'hui, l'intégration de la parole téléphonique et de la vidéo est généralisée dans les réseaux informatiques, même si cela ne va pas sans difficulté. On distingue généralement quatre catégories de réseaux informatiques, différenciées par la distance maximale séparant les points les plus éloignés du réseau :

- **PAN** (Personal Area Network) Les réseaux personnels, interconnectent sur quelques mètres des équipements personnels tels que terminaux GSM, portables, organiseurs, etc., d'un même utilisateur.
 - **LAN** (Local Area Network), réseau local d'étendue limitée à une circonscription géographique réduite (bâtiment...), ces réseaux destinés au partage local de ressources informatiques (matérielles ou logicielles) offrent des débits élevés de 10 à 100 Mbit/s.
 - **MAN** (Metropolitan Area Network), d'une étendue de l'ordre d'une centaine de kilomètres, les MAN sont généralement utilisés pour fédérer les réseaux locaux ou assurer la desserte informatique de circonscriptions géographiques importantes (réseau de campus).
 - **WAN** (Wide Area Network), ces réseaux assurent généralement le transport d'information sur de grande distance. Lorsque ces réseaux appartiennent à des opérateurs, les services sont offerts à des abonnés contre une redevance. Les débits offerts sont très variables de quelques kbit/s à quelques Mbit/s.
- La figure 1.2 illustre sommairement ces grandes catégories de réseaux informatiques.

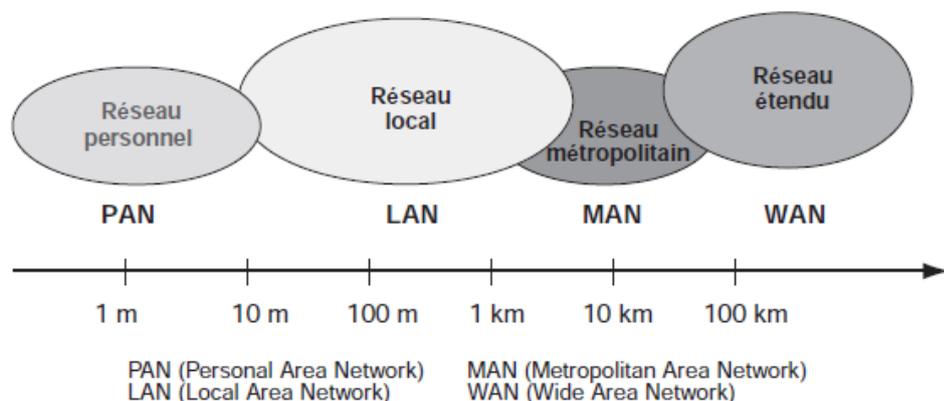


Figure 1.2 Les grandes catégories de réseaux informatiques.

Les réseaux se différencient, aussi, selon les modes de diffusion de l'information (figure 1.3). On distingue trois modes :

- La source diffuse ses informations vers des stations réceptrices. La relation est unidirectionnelle de 1 à N (réseau de diffusion). Les réseaux de radiodiffusion constituent un exemple de ce type de réseau. Les réseaux locaux sont aussi assimilés à cette catégorie.
- À l'inverse, un ensemble de stations peut envoyer les informations à un seul destinataire. La relation est aussi unidirectionnelle, mais de N à 1 (réseaux de collecte). Les réseaux de télémétrie constituent un exemple de ce mode de fonctionnement.
- D'une manière plus générale, un abonné d'un réseau désire pouvoir atteindre tous les autres abonnés ou une partie de ceux-ci. Le réseau doit établir une relation de 1 à 1 parmi N . Ces réseaux, de mise en relation, sont dits **réseaux de commutation**, le réseau téléphonique (RTC) en est un exemple.

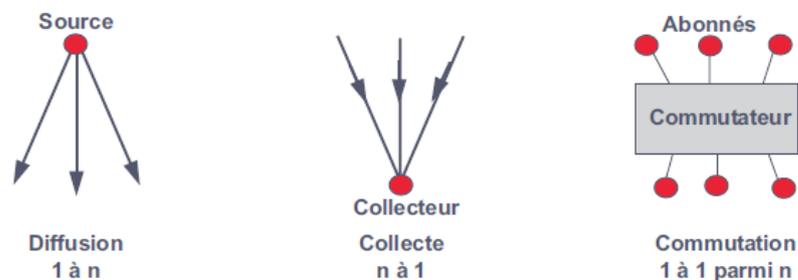


Figure 1.3 Classification selon les modes de diffusion de l'information.

1.1.3. Topologies physiques des réseaux

La topologie d'un réseau décrit la manière dont les nœuds sont connectés. Cependant, on distingue la **topologie physique**, qui décrit comment les machines sont raccordées au réseau, de la **topologie logique** qui renseigne sur le mode d'échange des messages dans le réseau (**topologie d'échange**).

Les topologies de bases sont toutes des variantes d'une liaison point à point ou multipoint (figure 1.4).



Figure 1.4. Les modes de liaison élémentaires

Dans **La topologie en bus** chaque station peut accéder à tout moment au support commun pour émettre. Les données sont diffusées à toutes les stations. Le temps de propagation n'étant pas nul, il peut se produire des *collisions* (des problèmes de conflit) d'accès lorsque différentes stations émettent au même moment. Cette topologie est une variante de la liaison multipoint. Le réseau en bus est aussi dit **réseau à diffusion**. Il offre des débits importants (>100 Mbit/s sur 100 m)

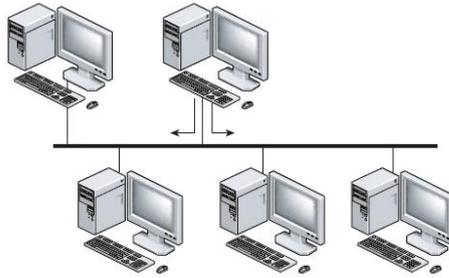


Figure 1.5. *La topologie en bus*

Dans **La topologie en anneau** Chaque poste est connecté au suivant en point à point (figure 1.6). L'information circule dans un seul sens, chaque station reçoit le message et le régénère. généralement pour offrir plus de fiabilité en cas de rupture du support. on réalise un double anneau qui peut transmettre soit dans le même sens soit en sens inverse.

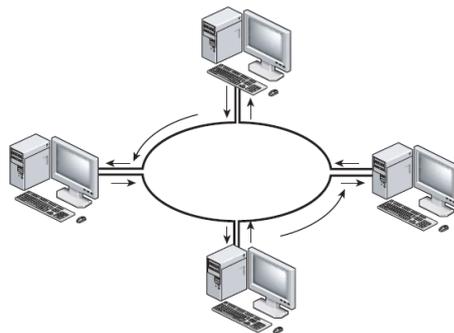


Figure 1.6. *La topologie en anneau.*

La topologie étoile est une variante de la topologie en point à point. chaque équipement est relié par une liaison spécifique à un équipement central. Tous les messages transitent par ce point central. Le concentrateur est actif, il examine chaque message reçu et ne le retransmet qu'à son destinataire (par

exemple, au réseau téléphonique privé d'une entreprise) La défaillance d'un poste n'entraîne pas celle du réseau, cependant le réseau est très vulnérable à celle du nœud central.

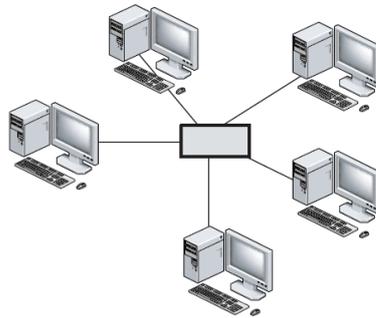


Figure 1.7. *La topologie étoile.*

1.2. Conception d'une architecture commutée

le commutateur met en relation les utilisateurs A et B.

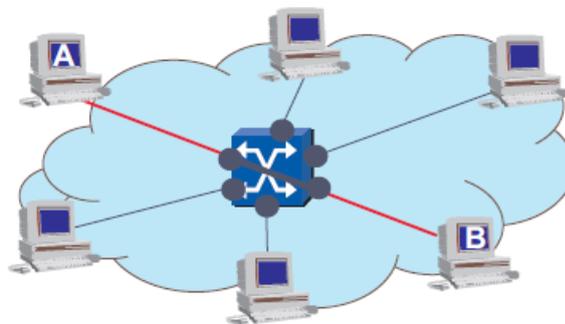


Figure 1.8. *Principe d'un réseau à commutation.*

Un réseau à commutation assure une connectivité totale. Dans ses conditions, la topologie logique ou interconnexion totale, vue du côté des utilisateurs, est différente de la topologie physique réelle (figure 1.9).

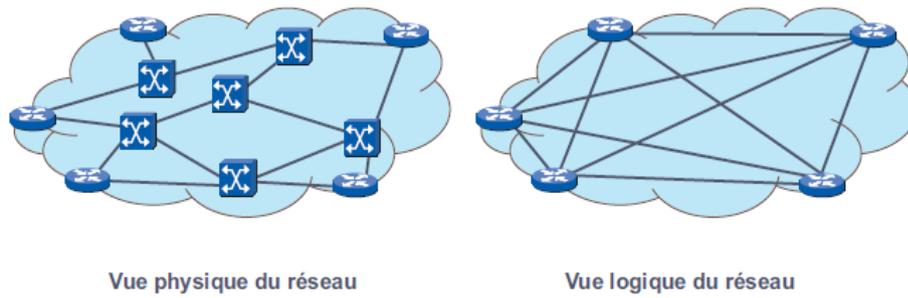


Figure 1.9. Conséquence de la commutation sur la vision du réseau.

Un réseau peut être vu comme étant la superposition de trois plans (figure 1.10) :

- Le **plan usager** qui correspond à l’installation privée de l’usager final.
- Le **plan service** qui correspond au point où le service requis par l’usager, service données ou voix, est mis à sa disposition. Ces réseaux peuvent être privés ou publics. L’usager est relié au plan service par une liaison d’abonné appelée aussi **boucle locale**. Les éléments actifs de ces réseaux (commutateurs, routeur...) ne sont pas reliés directement entre eux.
- Enfin, le **plan transmission** qui correspond au réseau réel de transport des données et de la voix. Ce sont les techniques de numérisation et de multiplexage qui ont autorisé le transport de manière banalisée de tout type de flux (voix, données, images). C’est à ce réseau que sont reliés les éléments actifs du réseau de transport.

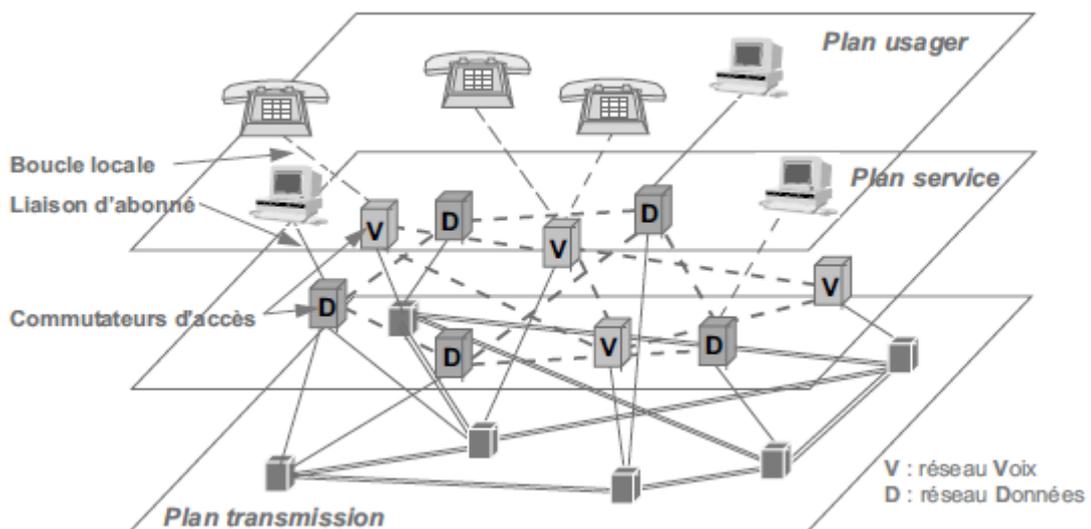


Figure 1.10. Les trois plans d’un réseau de transmission.

Rôle de l'Access Layer

- Attribution des VLANs
- Sécurité des ports
 - ✓ Sur cette couche, il est possible de mélanger des réseaux commutés (switch) et partagés (hub)
 - ✓ Définir les VLANs afin d'interdire la propagation des broadcasts et des multicasts
 - ✓ Filtrer le trafic en fonction des adresses MAC
 - ✓ Dédier de la bande passante à destination des serveurs
 - ✓ Authentifier les accès des utilisateurs au réseau
 - ✓ Cette couche est généralement composée de switches mais éventuellement aussi de routeurs pour les accès distants (ISDN, frame relay, ...)

Rôle du Distribution Layer

- Limiter les zones de broadcast
- Transférer les paquets entre VLAN
- Filtrer l'accès entre certains VLAN
 - ✓ Cette couche se trouve entre le coeur du réseau et la couche d'accès aux réseaux
 - ✓ Interconnecter entre-eux les switches de la couche d'accès au réseau et faire la liaison avec le coeur de réseau
 - ✓ Elle doit gérer les fonctionnalités de niveau 3 et mettre en place la politique de sécurité
 - ✓ Mettre en place les VLANs
 - ✓ Faire le routage entre les VLANs
 - ✓ Effectuer l'agrégation des routes
 - ✓ Relier entre-eux les différents types de média utilisés comme FDDI,
 - ✓ Ethernet ou Token Ring
 - ✓ Comme cette couche inter-connecte le coeur de réseau à la couche d'accès, elle doit être architecturée avec de la commutation rapide de niveau 3 (ou supérieure)

Rôle du Core Layer

- C'est le coeur du réseau
- Doit transférer les données le plus rapidement possible
- Apporte la connexion à Internet ou aux autres réseaux de la société via un MAN ou WAN

L'objectif de cette couche est de permettre la commutation entre les différentes couches de distribution aussi vite que possible

Généralement cette partie est assurée par de l'interconnexion de niveau 2 uniquement

L'utilisation de services de niveau 3 n'est pas recommandée

Les fonctionnalités de sécurité comme le filtrage de paquets ne sont pas appliquées par cette couche

Même avec des switchs multi-niveaux, cela nécessite de la manipulation de paquets: ce qui ralentit le trafic réseau

Exception: dans le cas d'un très grand réseaux avec des équipements dans la couche distribution nécessitant une implémentation d'une commutation de niveau 3. A utiliser avec précaution !

1.3. Avantages d'une architecture hiérarchique

- Scalabilité
 - Pouvoir faire des agrandissements du réseau simplement
- Redondance
 - Les services doivent être opérationnel 24/24
 - Exemple : pour la ToIP, on doit avoir une fiabilité de 99,999%, soit 5 min par an d'interruption de service
- Performance
 - Eviter les goulots d'étranglement
- Sécurité
 - Sécurisation des données et des accès au plus près de la source
- Administration simplifiée
- Maintenance facilité en raison de la modularité du réseau

1.4. Les Types de commutation :

Dans ce contexte où la ressource est rare vis-à-vis de la demande potentielle (si simultanément tous les abonnés du réseau désiraient joindre un autre abonné...), il est indispensable de rechercher des techniques particulières pour optimiser le partage des ressources, c'est l'objectif des techniques de commutation. Selon la technique employée pour « relier » deux utilisateurs, on distingue plusieurs types de commutation.

1.4.1. Commutation de circuits:

Dans les réseaux à commutation de circuits, de multiples supports de transmission relient les différents commutateurs. Échanger des informations entre deux équipements terminaux nécessite de déterminer un chemin (physique) dans le réseau et de réserver un support de transmission entre chaque paire de commutateurs situés sur ce chemin. Chaque commutateur reçoit les signaux d'une liaison et les retransmet sur la liaison vers le commutateur suivant. Ce type de commutation présente l'**inconvenient** de monopoliser les circuits entre commutateurs pendant toute la durée du dialogue, même pendant les périodes de silence.

la commutation de circuits requiert la disponibilité simultanée des deux équipements terminaux pour tout dialogue.

Nous voyons que la communication entre *A* et *D* traverse différents commutateurs et emprunte plusieurs circuits. Les deux équipements terminaux disposent de l'ensemble de ces ressources pour la durée de leur communication.

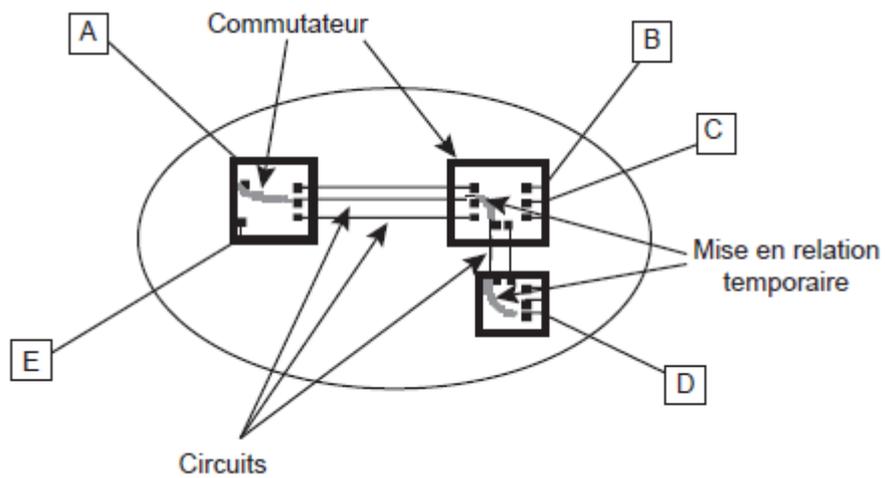


Figure 1.11. *Principe de la commutation de circuits : réservation de ressources physiques pour la durée de la communication.*

Archétype des réseaux, la commutation de circuits ou commutation spatiale est aujourd'hui remplacée par une commutation par intervalle de temps (IT) entre des multiplex entrants et des multiplex sortants (commutation temporelle, figure 1.12).



Figure 1.12. *La commutation temporelle*

1.4.2. Commutation de messages

Un message est une suite d'informations formant un tout logique (tout le message contrairement au paquet) pour l'expéditeur et le destinataire (une page de texte, un fichier son, une image fixe ou animée...).

Un utilisateur qui veut émettre un message l'envoie au commutateur en précisant l'adresse du destinataire. Le commutateur attend la réception complète du message, le stocke, analyse l'adresse du destinataire puis émet le message vers le commutateur voisin adéquat ou, le cas échéant, vers l'équipement terminal. L'aiguillage du message s'effectue en fonction des informations de contrôle. Le commutateur conserve le message si la liaison est occupée : chaque commutateur se comporte donc comme une mémoire tampon. Dans la commutation de messages, les liaisons ne sont utilisées que pour la durée de transmission entre les deux équipements adjacents.

Le délai de transmission dans le réseau est fonction du nombre de commutateurs traversés et de la longueur du message.

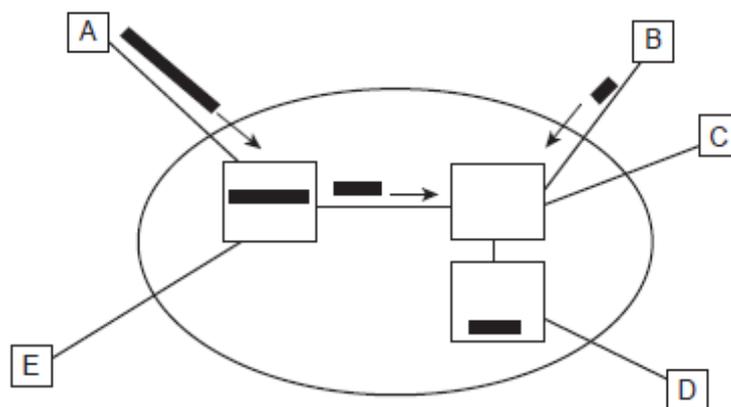


Figure 1.13. Réseau à commutation de messages : les liaisons ne sont utilisées que pour la durée de transmission entre équipements adjacents.

la figure si dessous montre le temps de réponse dans le transfert de messages (figure 1.14)

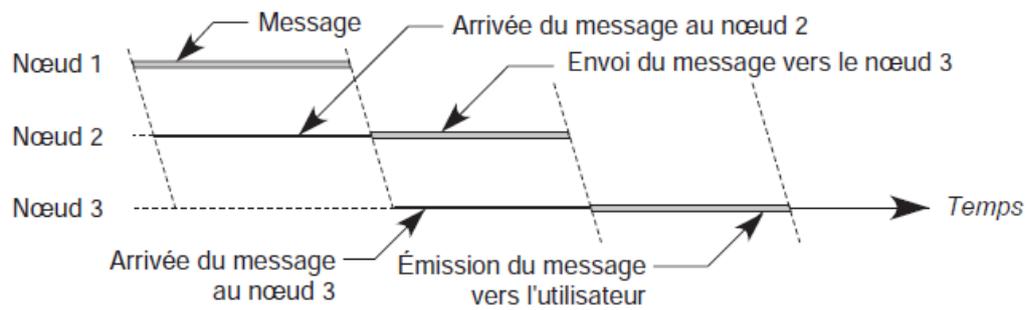


Figure 1.14. Temps de réponse dans le transfert de messages

Dans la réalité, ces techniques de transfert de messages ne sont plus utilisées et sont remplacées par des techniques de transfert de paquets.

1.4.3. La commutation de paquets:

Dans la commutation de paquets, on découpe d'abord le message en plusieurs morceaux, appelés paquets, avant de l'envoyer dans le réseau : cela s'appelle la fragmentation. Comme dans un réseau à commutation de messages, les commutateurs utilisent des informations de contrôle pour acheminer correctement les paquets depuis l'expéditeur jusqu'au destinataire. Contrairement à la commutation de messages, il n'y a pas de stockage d'information dans les nœuds (commutateurs) intermédiaires. Le destinataire doit attendre la réception de tous les paquets pour reconstituer le message et le traiter : cette opération est le *réassemblage*.

Comme pour la commutation de messages, une paire d'équipements ne monopolise plus une liaison entre commutateurs (elle peut supporter de plusieurs dialogues simultanés).

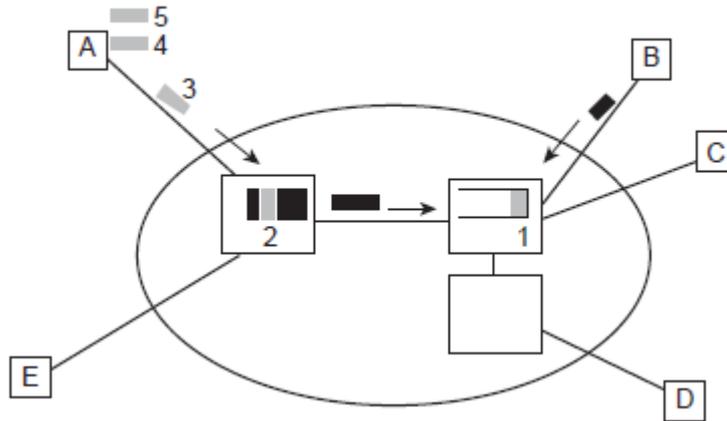


Figure 1.15. Réseau à commutation de paquets : il peut y avoir simultanément transmission de plusieurs paquets d'un même message sur différentes liaisons du réseau.

Le message émis par A est découpé en 5 paquets, acheminés un par un par le réseau.

Deux approches à cette détermination des liaisons :

a) *le service en mode connexion ou circuit virtuel:*

Dans ce cas avant tout échange d'informations, une connexion est établie entre les deux extrémités et elle est maintenue jusqu'à la fin. Ce principe assure que les données sont reçues dans le même ordre qu'elles sont envoyées. Ce mode de connexion est utilisé pour des transmissions fiables puisque le récepteur peut avertir en temps réel l'émetteur qu'il y a un problème de transmission.

b) *Systèmes sans connexion (IP) ou datagramme :*

Les informations sont fractionnées en paquets qui sont acheminés de manière indépendante (livraison autonome). Comme il n'est pas garanti qu'ils prennent la même route, l'ordre d'arrivée peut être différent.

Note1: Les réseaux à commutation de paquets établissent des routes via les commutateurs pour des connexions de bout en bout spécifiques. Ces routes sont appelées des circuits virtuels. **Circuit virtuel (VC):** circuit logique établi au sein d'un réseau entre deux périphériques réseau.

1.4.4. Commutation de cellules (multiplexage par étiquette)

La commutation de cellules est une commutation de trames particulière, dans laquelle toutes les trames ont une longueur fixe de 53 octets. Quelle que soit la taille des données à transporter, la cellule occupe toujours 53 octets. Si les données forment un bloc de plus de 53 octets, un découpage est effectué, et la dernière cellule n'est pas complètement remplie. La cellule ATM ((*Asynchronous Transfer Mode*)) en est un exemple. Elle est illustrée à la figure 1.16.

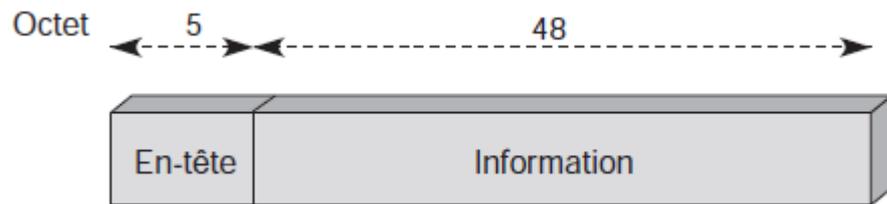


Figure 1.16 *La cellule ATM*

Cette cellule est formée de 53 octets, comprenant 5 octets d'en-tête et 48 octets de données. La commutation de cellules a pour objectif de remplacer à la fois la commutation de circuits et la commutation de paquets en respectant les principes de ces deux techniques (transmettre en temps réel sur le même réseau des données, de la parole et des images).

Chapitre 2 Réseaux Métropolitains

À l'origine, les réseaux métropolitains (MAN, Metropolitan Area Network) étaient essentiellement destinés à l'interconnexion de réseaux locaux d'entreprise. Fédérateurs de réseaux, ils offraient, au regard du débit des composantes locales, des débits élevés (≥ 100 Mbit/s), et couvraient des distances importantes (≥ 100 km). Devant le besoin croissant de débit, ils ont été utilisés en lieu et place des LAN traditionnels. Ces réseaux pouvaient donc à la fois être considéré comme des réseaux locaux (LAN), s'ils étaient utilisés essentiellement pour leur débit (100 Mbit/s ou plus) ou comme réseaux métropolitains s'ils l'étaient pour leurs caractéristiques de distance et les possibilités d'interconnexion de LAN. *Deux technologies ont longtemps dominé ce secteur : FDDI (Fiber Distributed Data Interface) et DQBD (Distributed Queue Dual Bus).*

2.1 FDDI (Fiber Distributed Data Interface=interface de données distribuée en fibre)

FDDI est un réseau en anneau optique sur fibre optique multimode. L'anneau est en fait un double anneau, ce qui permet une auto-cicatrisation du réseau en cas de défaillance d'un lien ou d'un nœud. Le débit nominal est de 100 Mbit/s pour une distance maximale de 100 km. FDDI supporte jusqu'à 1 000 stations, distantes l'une de l'autre de moins de 2 km.

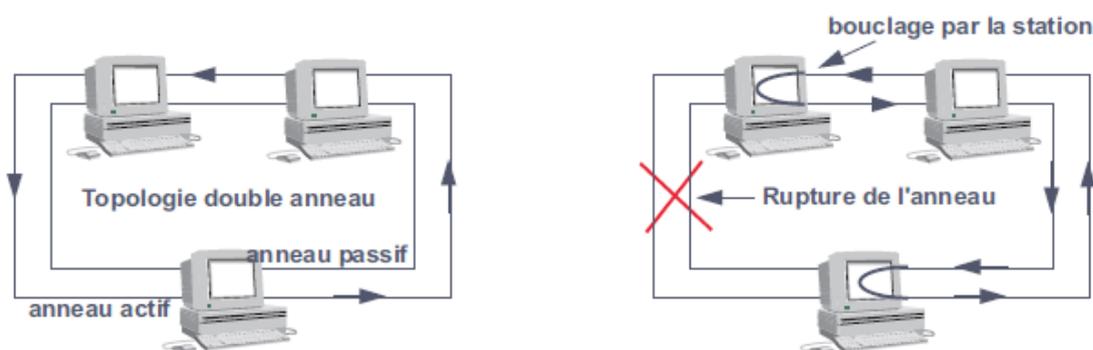


Figure 2.1. Reconfiguration rapide de l'anneau

FDDI est un protocole utilisant un anneau à jeton à détection et correction d'erreurs (c'est là que l'anneau secondaire prend son importance). Le jeton circule entre les machines à une vitesse très élevée.

Si celui-ci n'arrive pas au bout d'un certain délai, la machine considère qu'il y a eu une erreur sur le réseau. Une version de FDDI sur paire torsadée (TPDDI, Twisted Pair Distributed Data Interface) autorise des débits de 100 Mbits sur 100 m.

Pour accéder au support, une station doit posséder le jeton. Elle émet ses données puis génère un nouveau jeton. Chaque station retire de l'anneau les données qu'elle y a déposées. Plusieurs trames de données, issues de stations différentes, peuvent circuler sur l'anneau, mais il n'y a qu'un seul jeton libre à la fois.

En définissant deux types de données : les données urgentes à contrainte de débit (classe synchrone Ex. La voix téléphonique, la vidéo) et les données sporadiques, sans contrainte particulière de débit (classe asynchrone Ex. transfert de fichier, messagerie..), FDDI introduit aussi une notion réduite de la qualité de service. Lorsqu'une station possède le jeton, elle peut toujours émettre des données synchrones (données prioritaires) et, si et seulement si, le jeton est en avance (jeton temporisé), elle peut alors émettre des données asynchrones.

2.1.1. Caractéristiques des réseaux FDDI:

- La topologie est en double anneau contrarotatif de façon à pallier les pannes et les défaillances d'un coupleur.
- La longueur de la fibre peut atteindre 200 km, ce qui fait une distance maximale de 100 km lorsque le réseau est à plat.
- Le diamètre de l'anneau, s'il est mis en forme de boucle, est de 31 km.
- La distance maximale entre deux nœuds est de 2 km.
- Le débit théorique maximal est de 100 Mbit/s par boucle.
- La taille maximale des trames est de 45 000 octets.
- La méthode d'accès utilise un jeton temporisé, la synchronisation qui en découle assurant à l'utilisateur une qualité de service au moins du point de vue du débit.
- L'émission s'effectue en bande de base, et le codage des données est de type 4B/5B-NRZI.
- Le support physique consiste en de la fibre optique multimode 62,5/125, mais d'autres possibilités sont acceptables, notamment de la fibre optique monomode, qui porte la distance entre deux nœuds à 60 km au lieu de 2.
- Le nombre maximal de stations est de 500 en classe A et de 1 000 en classe B.
- Les adresses sont sur 16 ou 48 bits.
- Le principal protocole supporté est TCP/IP.

Il existe trois classes d'équipements : la classe A, connectée au double anneau, la classe C, composée des concentrateurs, et la classe B, qui regroupe les équipements connectés à un seul des anneaux par un concentrateur. Cette topologie est illustrée à la figure 2.2.

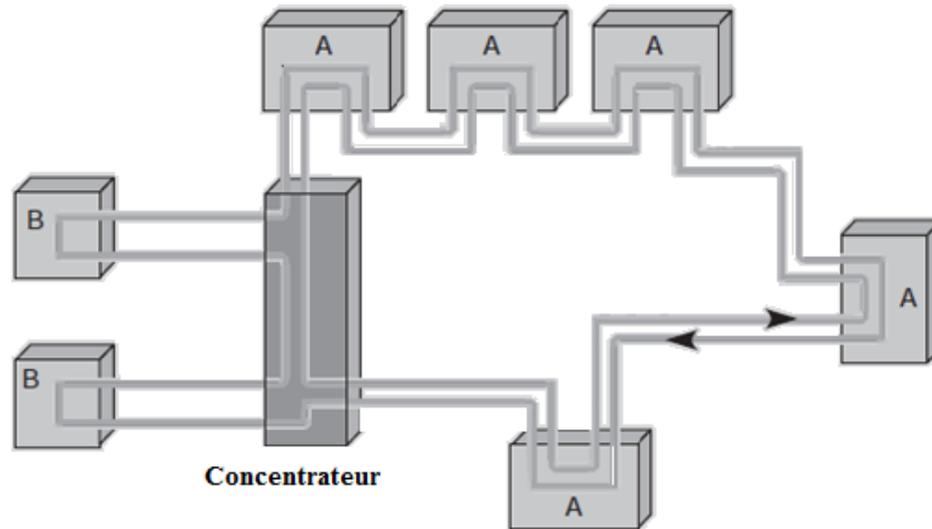


Figure 2.2. Topologie de la double boucle FDDI

2.2. DQDB (Distributed Queue Dual Bus= distribué à double bus)

DQDB (Distributed Queue Dual Bus) [IEEE 802.6] a été adopté par l'IEEE sous le nom de protocole MAN (Metropolitan Area Network) dans le standard 802.6. DQDB utilise le format (cellule de 53 octets dont 48 de charge utile). Parfois considéré comme une technologie pré-ATM, le transfert de données isochrones (dont la période a une durée constante) et asynchrones (mode connecté et non connecté). Les débits retenus pour DQDB sont de 45 Mbit/s, évoluer ultérieurement jusqu'à 600 Mbit/s. DQDB utilise un double bus unidirectionnel (figure 2.3). Sur chaque bus, une tête de bus (HoB, Head of Bus) génère, toutes les 125 μ s, une trame (trame DQDB) contenant (n) slots ou cellules de 53 octets. Le nombre de slots par trame (n) dépend du débit du réseau. Le premier bit de chaque slot (bit Busy) indique l'état du slot (libre ou occupé). Les débits disponibles sont de 45, 155 et 622 Mbit/s.

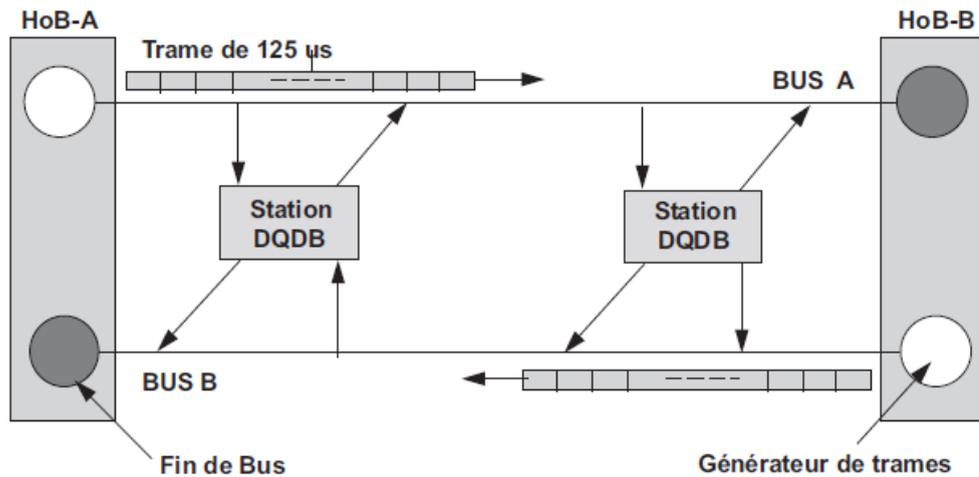


Figure 2.3. Principe général du réseau DQDB

Chaque station, qui a des données à émettre, les dépose dans un slot vide attribué de manière statistique pour le transfert de données asynchrones ou selon un pré-arbitrage, pour les données isochrones. Une station lit ou écrit au vol les données (fonction « OU logique ») dans une cellule ; elle ne les retire pas, la cellule les contenant s'évanouit en fin de bus (fonction d'absorption). Les stations sont à l'écoute des deux bus (bus A et bus B). L'émission n'a lieu que sur un seul bus en fonction de la position physique de la station avec laquelle elles veulent communiquer. Les messages de diffusion (broadcast) sont émis sur les deux bus.

2.3. L'ANNEAU À JETON (Token Ring), IEEE 802.5

2.3.1. Généralités

La norme IEEE 802.5 (ISO 8802.5) spécifie un réseau local en boucle (figure 2.4) : chaque station est reliée à sa suivante et à sa précédente par un support unidirectionnel. Ce réseau est connu sous le nom de Token Ring.



Figure 2.4. Principe de l'anneau.

Publiée en 1985, la norme IEEE 802.5 fut implémentée par IBM dès 1986. IBM est resté le principal acteur du monde Token Ring. L'implémentation d'IBM diffère quelque peu de la norme d'origine. Notamment, la topologie physique a évolué vers une étoile pour gérer la rupture de l'anneau. Les stations sont reliées à des concentrateurs (**MAU, Multiple Access Unit**) comme le montre la figure 2.5.

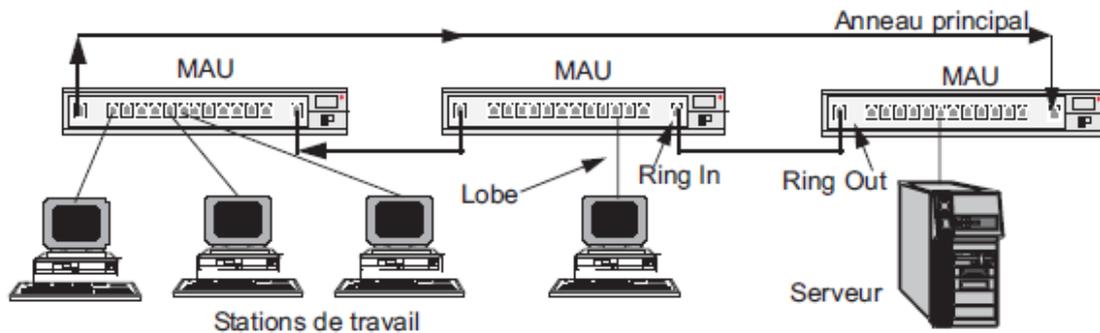


Figure 2.5. Présentation du réseau Token Ring.

Les spécifications d'installation du Token Ring sont contraignantes. Les possibilités de connexion, distance et nombre de postes, dépendent du type de câble utilisé. Avec du câble de type 1 ou 2 (dans la terminologie IBM, paires torsadées blindées d'impédance 150 V), la longueur maximale de l'anneau principal est de 366 m (chaque MAU comptant pour 4,9 m). Il peut comporter jusqu'à 260 stations pour une distance maximale station/MAU de 101 mètres. Les spécifications des éléments actifs ont évolué afin de supporter le précâblage d'immeuble à 100 V. Le connecteur spécifique IBM dit « hermaphrodite » est aujourd'hui remplacé par des prises RJ45.

2.3.2. Principe général du jeton sur anneau

Le mécanisme du jeton

Le droit d'émettre est matérialisé par une trame particulière « le jeton ou *token* ». Celui-ci circule en permanence sur le réseau. Une station qui reçoit le jeton peut envoyer une ou plusieurs trames, elle devient station maître. Si elle n'a rien à émettre, elle se contente de répéter le jeton, elle est dite : station répéteur. Dans un tel système, les informations (trames) transitent par toutes les stations actives.

Chaque station du réseau répète le jeton ou le message émis par la station maître, il n'y a pas de mémorisation du message, un bit reçu est immédiatement retransmis. Le temps alloué à une station pour la répétition d'un bit correspond à un temps bit (possibilité de modifier bit à bit le message). Chaque station provoque ainsi un temps bit de retard dans la diffusion d'un message.

Le jeton ne contient pas l'adresse d'un destinataire, le destinataire est la station qui suit physiquement celle qui le détient (technique du jeton non adressé). Le mécanisme du jeton est illustré par la figure 2.6.

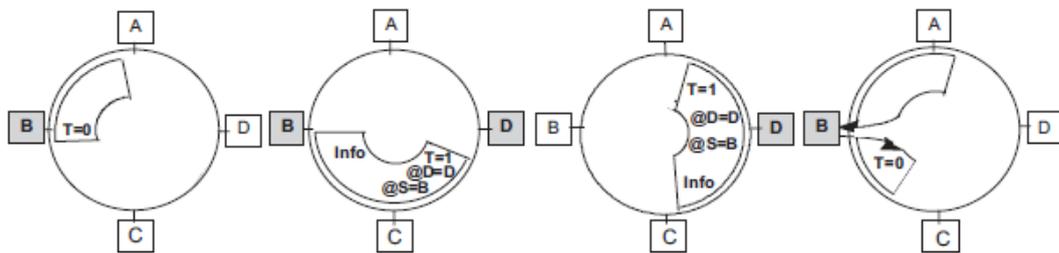


Figure 2.6. Principe du jeton.

Sur le premier schéma de la figure 2.6, la station B, qui a des données à émettre, reçoit un jeton libre. La disponibilité ou l'indisponibilité du jeton est indiquée par la valeur d'un bit : le bit T (*Token*) ; s'il est à zéro, le jeton est libre, sinon le jeton est marqué « occupé » ($T = 1$). La station B marque le jeton occupé ($T = 1$), émet à la suite du jeton son message (@Destination, @Source, informations), et devient, momentanément, le maître de l'anneau. Pour éviter qu'une station monopolise l'anneau, le temps de détention du droit d'émission est limité. Ce temps est, par défaut, d'environ 10 ms.

La station C lit le jeton, celui-ci est marqué occupé, elle lit l'adresse destination. N'étant pas le destinataire du message, elle ne fait que régénérer le message (fonction répéteur). La station D procède de même, mais elle reconnaît son adresse et recopie, au vol, le message.

B reçoit l'en-tête du message qu'il a émis. Elle l'ôte de l'anneau (ne le retransmet pas), dès qu'elle a reconnu son adresse (@Source) elle réémet un jeton libre sur le support ($T = 0$). Dans la version de base, à 4 Mbit/s, un seul jeton circule en permanence sur le support (système à trame unique). Pour faire évoluer le débit à 16 Mbit/s et améliorer l'efficacité, lorsque la station maître a terminé d'émettre son message, elle régénère un jeton (système à trames multiples ou protocole **ETR**, *Early Token Release*). De ce fait, plusieurs messages d'origines différentes et un jeton libre peuvent circuler en permanence sur le réseau. Quand une station a émis, les premiers bits qu'elle reçoit sont toujours ceux qu'elle a émis, sinon il y a une erreur. Ces bits ne sont pas répétés, la station élimine tous les bits jusqu'au délimiteur de fin de trame. Elle reprend après son rôle de répéteur.

Le Token-Ring comporte également une fonction moniteur, qui a pour rôle de détecter et corriger les erreurs, telles que : Erreurs temporaires et Erreurs permanentes

2.4. Ethernet

Ether=milieu de propagation=support

Net=Network=réseau

Les réseaux de type Ethernet sont certainement ceux qui se sont le mieux adaptés à l'évolution des besoins. D'abord en terme de débit en passant de 3 Mbit/s pour la première version expérimentale à 40 Gbit/s, ensuite en migrant d'un environnement à contention vers un environnement commuté. Initialement destiné aux applications en mode texte, Ethernet aujourd'hui supporte tout type de transfert : voix, données, vidéo. La figure 5 présente une synthèse de ces évolutions.

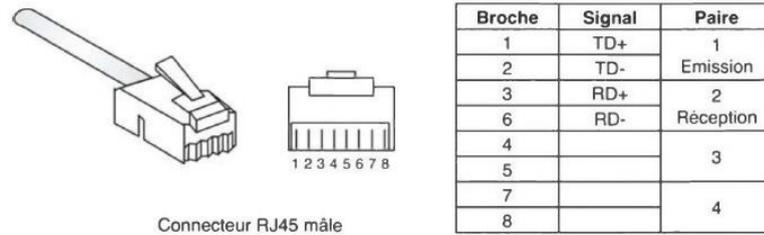
Sur les anciens réseaux Ethernet en câble coaxial, la station était directement reliée au réseau par l'intermédiaire d'un connecteur. Pour des liaisons sur paires torsadées (10BaseT, 100BaseT ou 1000BaseT) ou sur fibre optique (100BaseF ou 1000BaseF), il est nécessaire d'utiliser des équipements d'interconnexion spécifiques : *hub* ou *switch*.

2.4.1. Normes et débits sur Ethernet

a) La connectique

La liaison en 10BaseT, 100BaseT ou 1000BaseT au *hub* ou au *switch* est réalisée par des connecteurs à huit contacts de type RJ45 (figure 2.7) et par des câbles de différentes catégories suivant le débit, seules deux paires torsadées par câble sont utilisées : une pour l'émission et une pour la réception. La communication bidirectionnelle entre deux stations nécessite que la paire d'émission de l'une (paire 2) soit reliée à la paire de réception de l'autre (paire 3) et réciproquement. Pour relier directement deux stations, il faut donc inverser les fils sur l'un des connecteurs (paire 2 vers paire 3 et inversement), il s'agit alors d'un câble croisé. Pour éviter cette inversion qui complique le câblage, les équipements d'interconnexion (*hub*, *switch*, routeur) réalisent en interne le croisement et un câble droit peut être utilisé pour relier la station à l'équipement.

Par ailleurs, seul le câble de catégorie 5 non blindé (UTP, *Unshielded Twisted Pairs*) ou blindé (STP, *Shielded Twisted Pairs*) permet d'atteindre des débits de 100 Mbit/s ou 1 Gbit/s dans certains cas particuliers. Les câbles plus performants de catégorie 6a permettent d'atteindre les débits de 10 Gbit/s définis par la norme 10GBaseT.



Connecteur RJ45 mâle

Figure 2.7. Connecteur et câblage RJ45.

2.4.2 Ethernet IEEE 802.3 de première génération

La société Xerox a développé Ethernet en 1976. Ce fut le premier produit de réseau local utilisant le mécanisme CSMA/CD sur un bus physique. Vu son grand succès, les sociétés Xerox, DEC et Intel ont décidé d'en faire un standard qui a servi de base au comité IEEE pour sa norme 802.3, même si Ethernet et le standard IEEE 802.3 diffèrent sur des points mineurs. La réussite d'Ethernet a été considérable : il est d'usage courant maintenant d'appeler Ethernet tout réseau local utilisant CSMA/CD, même s'il n'a plus grand-chose en commun avec le réseau initial.

a) L'Ethernet épais, IEEE 802.3 10Base5

Les appellations IEEE désignent d'abord le sous-comité (802.3), le type de modulation (bande de base ou large bande : Broad band) et le diamètre du réseau ou le type de support. La version 10Base5, (10 Mbit/s en bande de base sur câble coaxial d'une longueur maximale par segment de 500 m) utilise un codage Manchester. La figure 6 illustre cette version d'origine de l'Ethernet.

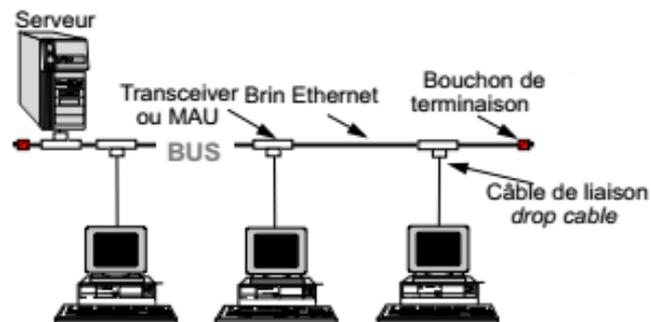


Figure 2.8. Le réseau Ethernet jaune

Chaque station est équipée d'une interface « Ethernet » (NIC, Network Interface Card) généralement appelée carte transporteur ou carte « Ethernet ». Cet équipement assure l'adaptation physique (niveaux électriques, encodage...). Le raccordement d'une nouvelle station peut être réalisé sans interrompre le trafic.

Le **MAU** contient l'électronique d'émission et de réception, il assure la détection des collisions qu'il signale à la station

Le drop cable, d'une longueur maximale de 50 m, est constitué de paires torsadées (5 paires). Le câble coaxial est un câble épais de couleur jaune (Ethernet jaune) dont les principales caractéristiques sont : diamètre un demi-pouce, impédance 50 Ω , coefficient de vélocité 0,77. Un transceiver peut être connecté tous les 2,5 m avec un maximum de 100 stations actives par segment de 500 m. La longueur totale du réseau peut atteindre 2,5 km (5 segments). Il est recommandé de n'utiliser que des segments dont la longueur est un multiple impair de 23,4 m (longueur d'onde sur ce type de câble du signal à 10 MHz).

Cette version d'Ethernet n'est plus que très rarement utilisée. On la trouve encore les environnements compromis (rayonnement électromagnétique) ou lorsque l'on veut garantir la confidentialité des échanges (pas de rayonnement du câble coaxial), elle reste moins onéreuse qu'une solution sur fibre optique. Le câblage en bus étant moins volumineux qu'un câblage étoile, cette version trouve encore son utilité à chaque fois que des problèmes d'encombrement se posent.

b). L'Ethernet fin, IEEE 802.3 10Base2

Compte tenu des difficultés de câblage de la version 10Base5, une version économique a été définie sur du câble coaxial fin (Thin Ethernet). Dans cette version, les fonctions du transceiver sont remplies par la carte transporteur (MAU intégré à la carte). De ce fait, le bus coaxial est connecté directement sur la carte par l'intermédiaire d'un T vissé BNC (Barrel Neck Connector). La longueur maximale d'un segment est de 185 m et chaque segment peut accueillir un maximum de 30 stations. La figure présente cette version du réseau Ethernet.

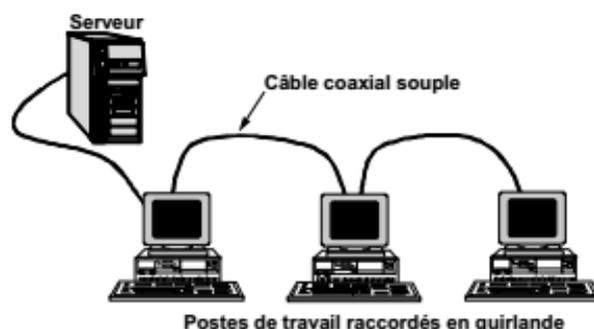


Figure 2.9. *L'Ethernet fin.*

Cette architecture physique de réseau a été très utilisée pour réaliser de petits réseaux d'une dizaine de machines.

c). L'Ethernet sur paires torsadées, IEEE 802.3 10BaseT

Compte tenu des difficultés du câblage coaxial, AT&T (American Telephone & Telegraph) a imaginé de réutiliser le câblage téléphonique préexistant dans les immeubles de bureaux pour la réalisation de réseau. Le réseau devait alors passer d'une topologie physique et logique en bus à une topologie physique étoile, assurer la diffusion des messages (topologie logique en bus) et la détection des collisions. La solution adoptée par AT&T consiste simplement à émuler un bus dans un boîtier : le hub. Le hub est chargé d'une part de concentrer les connexions et d'autre part d'assurer la diffusion des messages (figure 2.10).

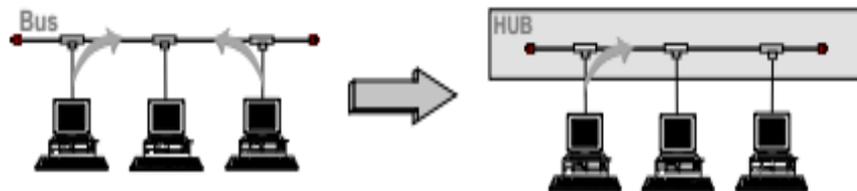


Figure2.10. Le passage du bus à l'étoile

La liaison hub/station est réalisée en paires torsadées (1 paire émission, 1 paire réception), ce qui impose deux contraintes : l'une de débit, l'autre de distance. Ce réseau fonctionne à 1 Mbit/s, les stations sont connectées sur des concentrateurs répéteurs (hub) et la distance entre le hub et une station est limitée à 250 m. Pour augmenter les capacités d'accueil et/ou de distance, les hubs peuvent être chaînés entre eux, cette cascade de hubs est illustrée par la figure 2.10 pour les réseaux Ethernet 10BaseT. Cette architecture (802.3 1Base5 ou Starlan), complètement obsolète, est à l'origine de la version à 10 Mbit/s (802.3 10BaseT, T pour Twisted pair) qui en reprend les principes. La figure 2.11 illustre la réalisation des premiers câblages Ethernet sur paires téléphoniques. Ce mode de câblage utilisait un double brassage, un premier entre le hub et la ferme ressource téléphonique et un second entre la ferme ressource et la ferme distribution. Les premiers câblages dédiés réseau données sur paires torsadées ont repris ce double brassage, inutilisé aujourd'hui.

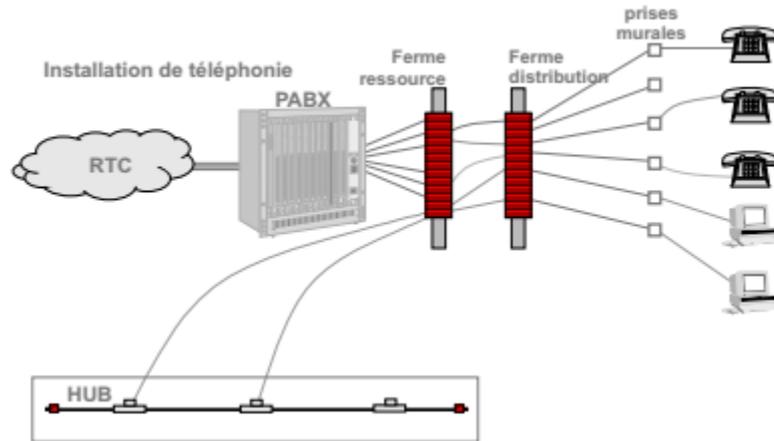


Figure 2.11. Principe des premiers câblages sur paires torsadées.

2.4.3. Le Fast Ethernet 100 Mbit/s

Fast Ethernet est la dénomination de l'extension à 100 Mbit/s du réseau Ethernet à 10 Mbit/s. C'est le groupe de travail IEEE 802.3u qui en est à l'origine. La technique d'accès est la même que dans la version Ethernet 10 Mbit/s, mais à une vitesse multipliée par 10. Les trames transportées sont identiques. Cette augmentation de vitesse peut se heurter au système de câblage et à la possibilité ou non d'y faire transiter des débits aussi importants.

C'est la raison pour laquelle trois sous-normes ont été proposées pour le 100 Mbit/s :

- IEEE 802.3 100BaseTX, qui requiert deux paires non blindées (UTP) de catégorie 5 ou deux paires blindées (STP) de type 1.
- IEEE 802.3 100BaseT4, qui requiert quatre paires non blindées (UTP) de catégories 3, 4 et 5.
- IEEE 802.3 100BaseFX, qui requiert deux fibres optiques.

La distance maximale entre les deux points les plus éloignés est fortement réduite par rapport à la version à 10 Mbit/s. La longueur minimale de la trame étant toujours de 64 octets, le temps de transmission est de 5,12 μ s. On en déduit que la distance maximale qui peut être parcourue dans ce laps de temps est de l'ordre de 1 000 m, ce qui représente pour le réseau Fast Ethernet une longueur maximale d'approximativement 500 m. Comme le temps de traversée des hubs est relativement important, la plupart des constructeurs limitent la distance maximale à 210 m pour le Fast Ethernet. Le temps entre deux trames, ou intergap, est réduit à 0,96 μ s.

Cette solution a l'avantage d'offrir une bonne compatibilité avec la version à 10 Mbit/s, qui permet de relier sur un même hub des stations à 10 Mbit/s et à 100 Mbit/s. Le coût de connexion du 100 Mbit/s est aujourd'hui le même que celui de l'Ethernet classique, dix fois moins rapide. Les réseaux Fast Ethernet

servent souvent de réseaux d'interconnexion de réseaux Ethernet 10 Mbit/s. La distance relativement limitée couverte par le Fast Ethernet ne lui permet toutefois pas d'« arroser » une entreprise un peu grande. Le Gigabit Ethernet, que nous détaillons ci-après, ne résout pas davantage ce problème dans sa version partagée. En revanche, la version commutée n'ayant plus de contrainte de distance, le Gigabit Ethernet commuté est une des solutions d'interconnexion des réseaux Fast Ethernet.

Une autre solution pour étendre la couverture du réseau Ethernet consiste à relier des Fast Ethernet par des ponts destinés à filtrer les trames à l'aide de l'adresse MAC. Ces ponts ayant les mêmes fonctionnalités que les commutateurs, on trouve aujourd'hui dans les grandes entreprises des réseaux à transfert de trames Ethernet qui utilisent des commutateurs Ethernet. Nous examinons ces nouvelles architectures ultérieurement dans ce chapitre.

2.4.4. Le Gigabit Ethernet

Fast Ethernet est une version d'Ethernet à 100 Mbit/s compatible avec les réseaux à 10 Mbit/s. Elle a été largement diffusée dans le milieu des années 1990. Les réseaux Fast Ethernet servent souvent de réseaux d'interconnexion de réseaux Ethernet 10 Mbit/s. La distance relativement limitée couverte par le Fast Ethernet ne lui permet toutefois de desservir une grande entreprise.

La technique d'accès au support physique, le CSMA/CD, est également modifiée. Pour être compatible avec les autres versions d'Ethernet, ce qui est un principe de base, la taille de la trame émise doit se situer entre 64 et 1 500 octets. Les 64 octets, c'est-à-dire 512 bits, correspondent à un temps d'émission de 512 ns. L'architecture générale du Gigabit est représentée figure 2.12.

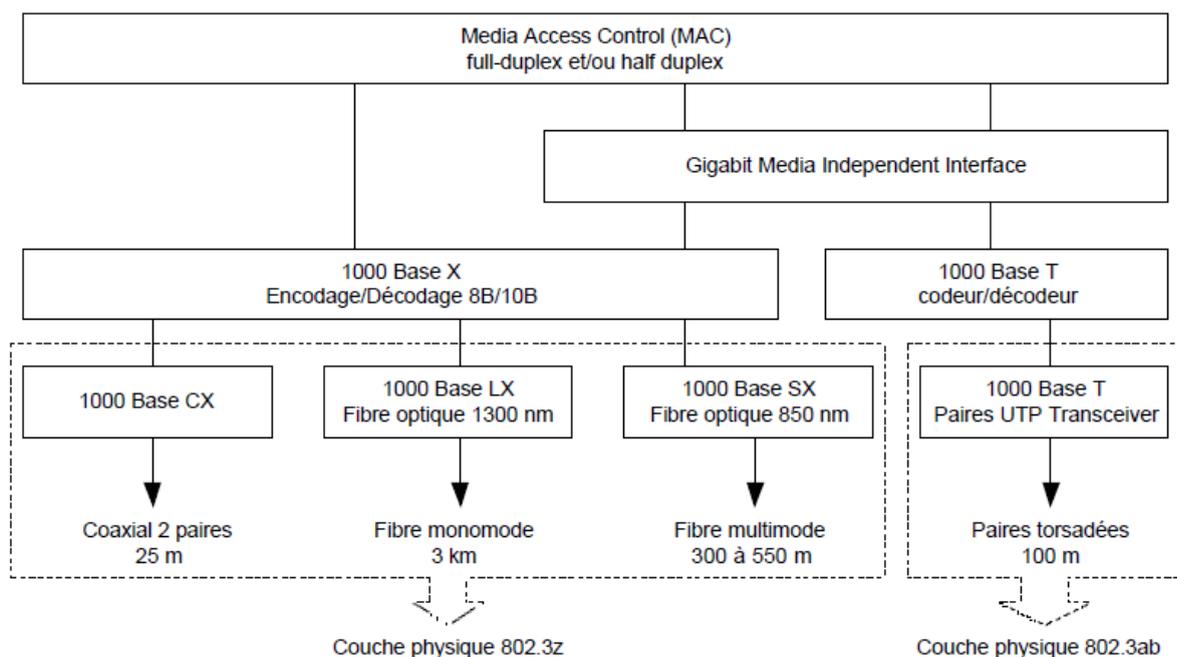


Figure 17.19. L'architecture du Gigabit Ethernet.

Gigabit Ethernet s'est développé dans les environnements commutés et possède deux modes de fonctionnement : les modes *duplex intégral* et *semi-duplex*. Dans le mode duplex intégral, utilisé sur les liaisons point à point, un équipement émet et reçoit simultanément des données avec le commutateur ; il n'y a plus de collision possible. Le semi-duplex est employé pour les équipements raccordés par l'intermédiaire d'un concentrateur. Dans ce cas, des collisions peuvent encore se produire. Les équipements Gigabit Ethernet combinent généralement des ports 10, 100 et une ou plusieurs connexions sur fibre optique à 1 000 Mbit/s. La figure 2.13 propose un exemple d'application du Gigabit Ethernet en tant que réseau fédérateur de réseaux à 100 ou 10 Mbit/s.

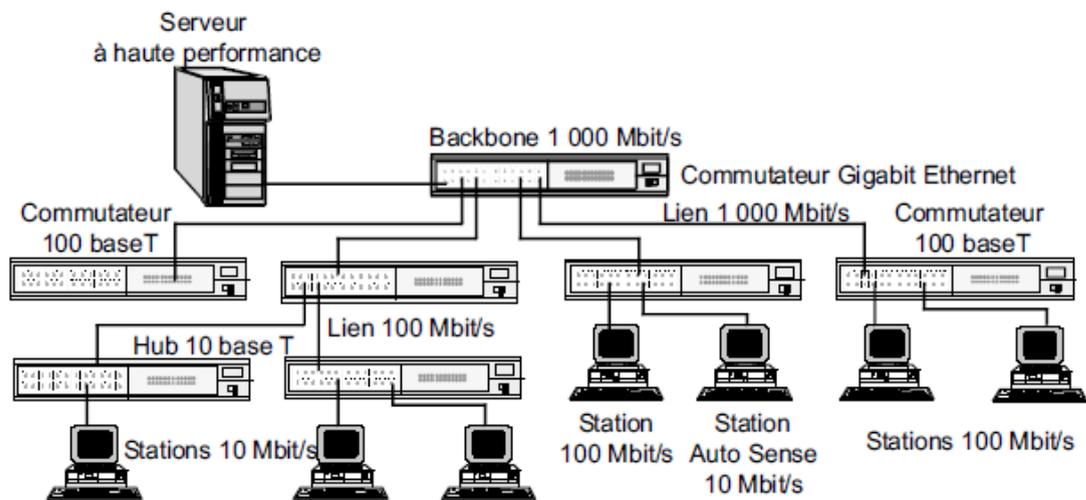


Figure 2.13. Exemple d'utilisation du Gigabit Ethernet.

2.4.5. Le 10 Gigabit Ethernet

Avec la publication IEEE 802.3ae, Ethernet multiplie encore le débit par 10. L'Ethernet 10 Gbit/s est utilisé pour la connexion de serveurs gérant des grands flux de données, comme les serveurs de sauvegarde ou pour raccorder un LAN sur la boucle locale vers Internet. Le 10 GE conserve la compatibilité avec les versions précédentes : définition du format de trame, taille minimale et maximale, contrôle de flux. Cette norme fonctionne en *full duplex* uniquement et essentiellement sur fibre optique bien que les câbles en paire torsadée de catégorie 6a soient compatibles.

Chapitre 3 **Les réseaux de transport**

Une des grandes tendances de la fin des années 90 est la demande croissante en bande passante des réseaux d'entreprises et des réseaux d'opérateurs, due principalement aux nouveaux usages liés à Internet (services multimédia, commerce électronique, liaisons privées,...). Cette évolution s'est accompagnée d'une transformation technologique profonde des réseaux de transport afin de pouvoir écouler les volumes de trafic en perpétuelle croissance. En effet, les réseaux de transport ont évolué à travers trois grandes étapes: réseaux asynchrones PDH (Plesiochronous Digital Hierachy), réseaux synchrones SDH (Synchronous Digital Hierachy) et réseaux optiques WDM (Wavelength Division Multiplexing). Ce chapitre concerne l'étude des plans de transmission, de service et des modes d'accès à ce dernier.

3.1 LE PLAN DE TRANSMISSION

Jusqu'aux années 1960, les réseaux étaient fondamentalement distincts, il était même interdit d'effectuer des transferts de données sur le réseau téléphonique. Avec la numérisation de la voix, les infrastructures se sont banalisées (figure 3.1). Pour optimiser l'utilisation des supports de transmission, le CCITT (UIT-T) a normalisé, à partir des liaisons MIC (Modulation par impulsion et codage), différents niveaux de multiplexage. Cette hiérarchie appelée **PDH** (*Plesiochronous Digital Hierarchy*), différente en Amérique du Nord et au Japon, a constitué la base de tous les réseaux de transmission jusqu'aux années 1990.

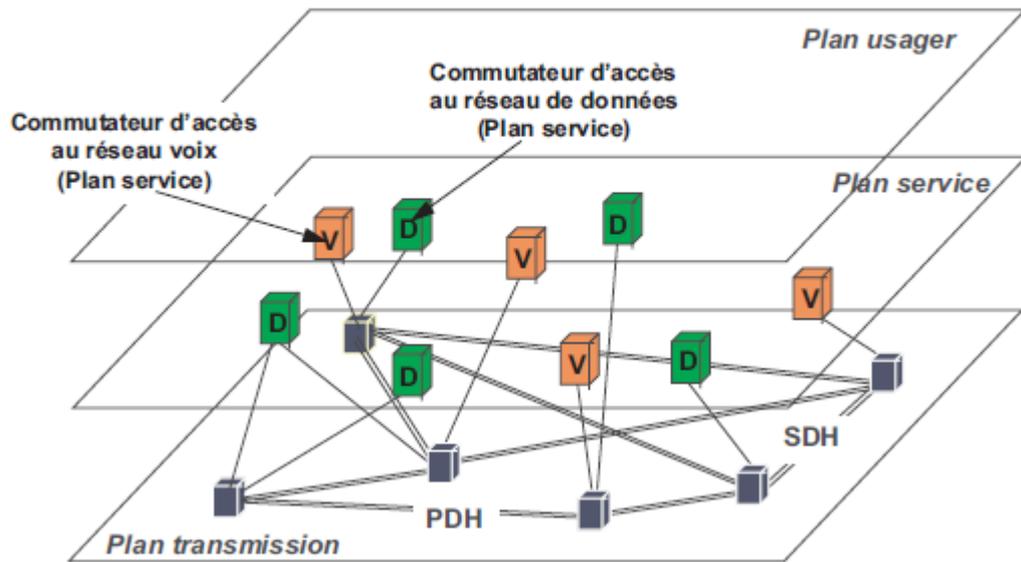


Figure 3.2. *Le plan de transmission.*

Le besoin en hauts débits nécessite des infrastructures de transport adaptées. Nous passerons en revue deux infrastructures usuelles : PDH et SONET/SDH.

3.1.1. La hiérarchie plésiochrone (PDH)

La hiérarchie PDH est apparue avec la numérisation de la voix et la nécessité de transporter simultanément plusieurs canaux téléphoniques sur un même support (multiplexage temporel). Le multiplex de base est constitué du regroupement de plusieurs canaux (voies) téléphoniques du RNIS de 64 kbit/s (un octet de voix transféré toutes les 125 us). Les regroupements sont différents en Europe, au Japon et aux États-Unis, ce qui a conduit à la définition de différentes hiérarchies plésiochrones illustrées par la figure 3.2.

La concaténation de plusieurs voies permet une granularité des débits modulo 64 kbit/s. Les sur débits entre les différents niveaux de regroupement sont dus aux signaux d'alignement, de supervision et de justification binaire. Les niveaux 5 ne sont pas normalisés par l'UIT-T.

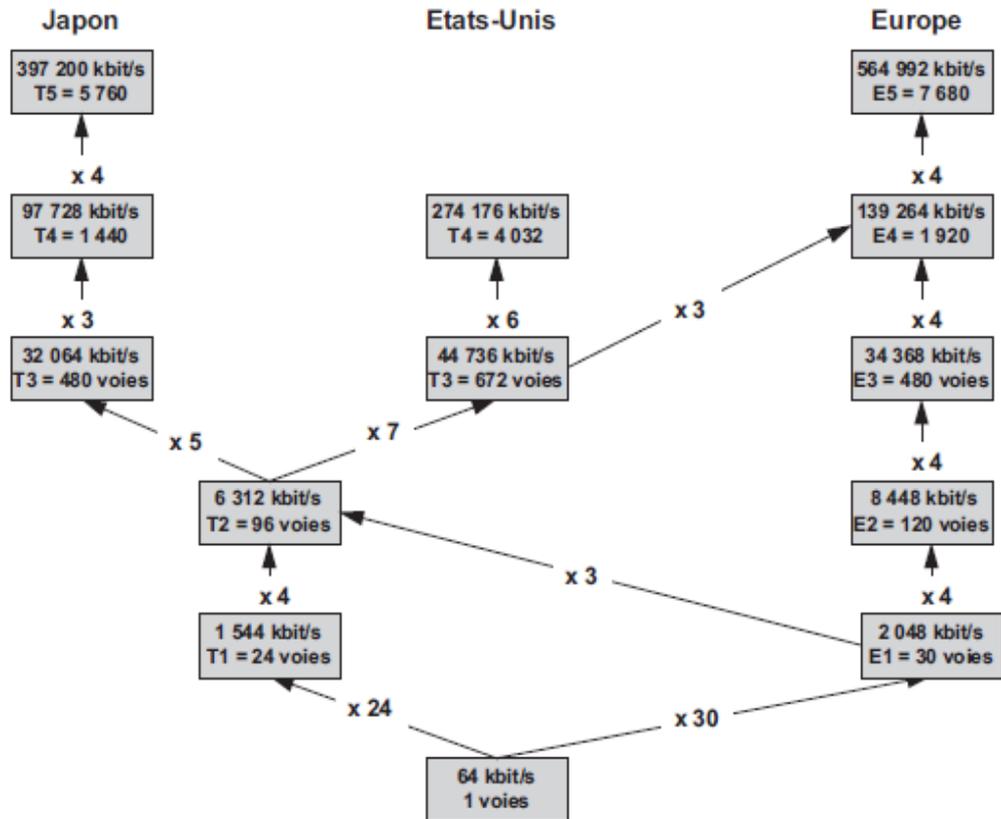


Figure 3.2. Les différents regroupements en hiérarchie PDH.

a) La trame de base du système européen

La trame de base regroupe 30 voies de communication (Intervalles de temps, IT ou *Slot time*) et deux voies de service de 8 bits. La position de chaque voie est déterminée en comptant un certain nombre de temps d'horloge à partir d'une combinaison particulière de bits appelée **mot de verrouillage de trame (MVT)** qui balise le début de la trame de 32 voies (IT). L'organisation de base de la trame (G.704) est illustrée par la figure 3.3.

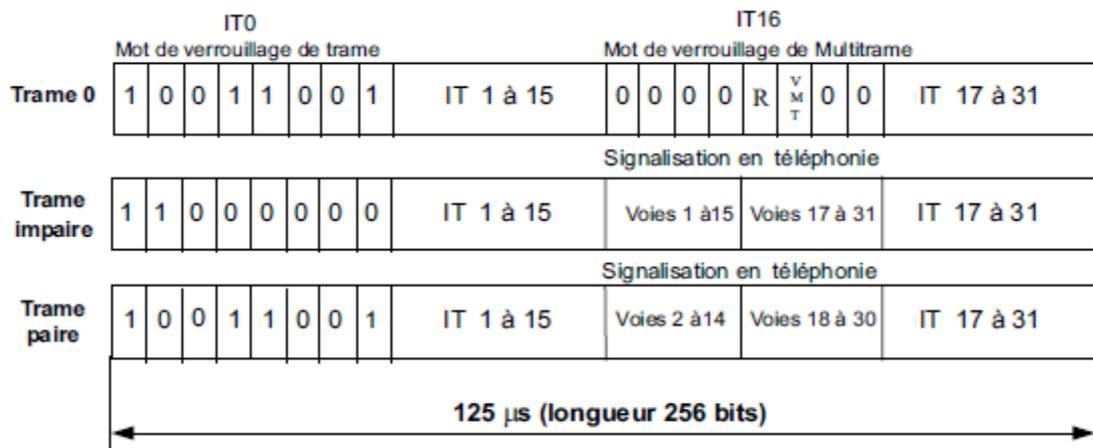


Figure 3.3. L'organisation de la trame G.704 ou G.732 (téléphonie).

Les trames sont regroupées selon une structure dite de **multitrame**, cette structure regroupe deux sous-groupes de 16 trames numérotées globalement de 0 à 31. Ce regroupement permet le transport d'informations spécifiques notamment de contrôle d'erreur sur 4 bits émis bit par bit dans le premier bit de chaque IT0 (bit X de la figure 3.3). L'IT0 des trames paires transporte une information de synchronisation dite mot de verrouillage de trame ou MVT (X0011011). Les bits P et D des trames impaires transportent une information d'alarme (P, alarme urgente ; D, alarme non urgente). Enfin, les bits YYYY sont laissés à disposition pour un usage national. L'IT16 de la trame 0 sert de fanion pour indiquer le début d'une séquence de 16 trames (**mot de verrouillage multitrame**). Le bit A est utilisé pour signaler une perte d'alignement de la multitrame.

b) La trame de base du système américain

La trame nord-américaine (utilisée aussi au Japon) ou T1 comporte 24 IT de 64 kbit/s donnant un débit total de 1 544 kbit/s et un débit utile de 1 536 kbit/s.

À l'instar de la trame G.704, la signalisation comporte deux types d'information, celles relatives à la structure de la trame (ou **signalisation de supervision**) et celles en rapport avec l'état de chaque canal téléphonique (**signalisation voie par voie** ou CAS).

La trame de base **T1** (trame G.733, aussi notée DS1 à DS12), représentée figure 3.4, comprend 24 IT (DS0) de 8 bits (192 bits). La multitrame de premier niveau regroupe 12 trames de base. Chaque trame de base est précédée d'un bit (bit de tramage constituant la signalisation de supervision). Ces 12 bits forment un mot (mot **SF**, *SuperFrame*) représentant la séquence binaire 100011001100 et identifiant la trame.

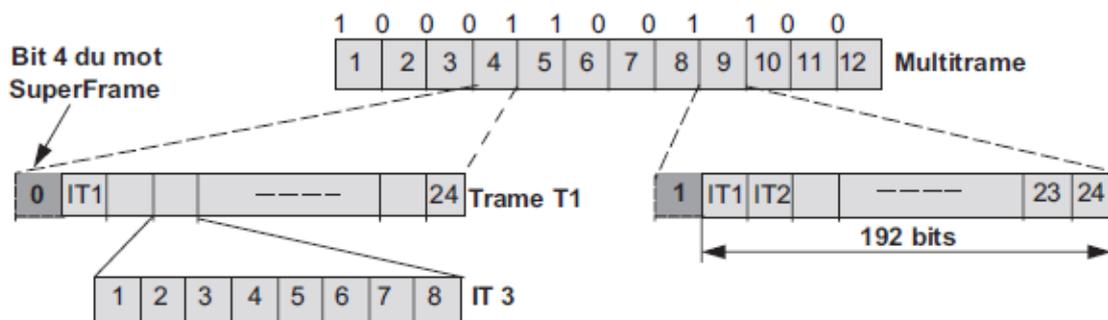


Figure 3.4. Organisation de la multitrame T1.

La signalisation téléphonique de chacune des voies est réalisée par vol, toutes les 6 trames, du bit de poids faible dans l'IT (un bit de signalisation est substitué au bit d'information, c'est une signalisation dans la bande). Remarquons que, si en téléphonie ce mode de signalisation est efficace puisqu'il économise un IT, en transmission de données, il pénalise fortement le système, la bande utile n'étant que de 56 kbit/s par IT (7 bits, toutes les 125 ms).

3.1.2. La technologie SDH

La hiérarchie numérique synchrone SDH représente un standard international pour les télécommunications à haut débit dans les réseaux optiques de transmission. Cette technologie permet le transport des signaux numériques transmis avec des débits variables. Basée sur la technique de multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing), SDH est conçue pour gérer les communications en mode circuit de bout en bout et est utilisée pour transporter des flux IP/MPLS, ATM, DSL, Ethernet, PDH, etc.

a) La hiérarchie synchrone (SDH)

Outre l'utilisation d'un sur débit (justification et bourrage) qui consomme inutilement de la bande passante, l'inconvénient majeur de la hiérarchie PDH réside dans l'obligation de démultiplexer complètement le train à haut débit pour reconstituer un lien à 2 Mbit/s. La figure 3.5 illustre l'extraction d'un conduit à 2 Mbit/s d'un lien à 140 Mbit/s.

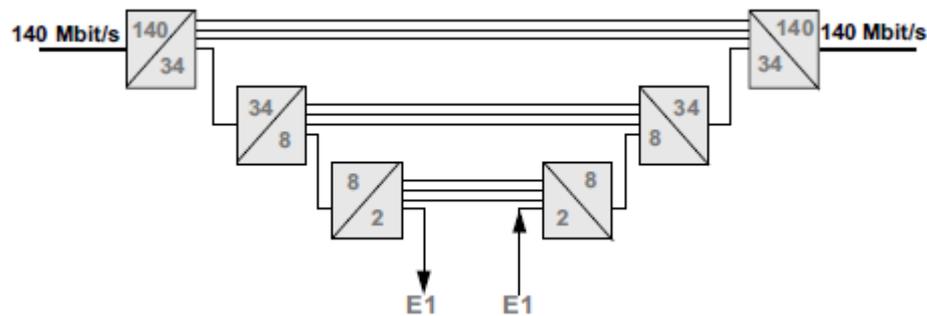


Figure 3.5. Constitution d'une liaison à 2 Mbit/s entre A et B en PDH.

La hiérarchie synchrone se distingue essentiellement de la hiérarchie plésiochrone par la distribution d'horloge à tous les niveaux du réseau réduisant les écarts d'horloge. Les signaux sont encapsulés dans un « *container* ». À chaque *container* est associé un surdébit destiné à l'exploitation de celui-ci. Le *container* et le surdébit constituent un *container virtuel (VC, Virtual Container)*. Un *pointeur (surdébit)* pointe sur la charge utile de la trame. Lorsque l'horloge source n'est pas en phase avec l'horloge locale, la valeur du *pointeur* est incrémentée ou décrémentée. L'utilisation de ces *pointeurs* permet d'insérer ou d'extraire un train numérique de différents débits sans être contraint de reconstituer toute la hiérarchie de multiplexeurs (figure 3.6). Ce dernier point constitue l'un des principaux avantages de la hiérarchie SDH par rapport à la hiérarchie PDH.

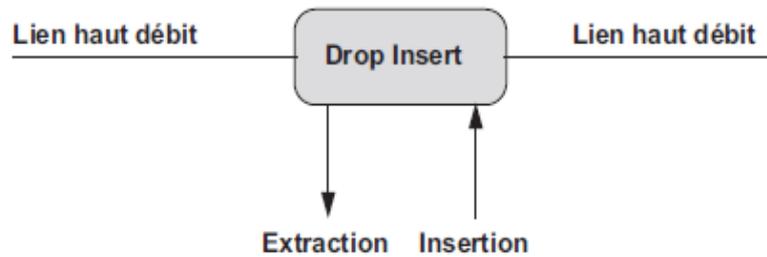


Figure 3.6. Insertion et extraction d'un niveau inférieur.

On distingue deux types de hiérarchie synchrone : la hiérarchie SDH en Europe et la hiérarchie **SONET** (*Synchronous Optical NETWORK*) aux États-Unis. Pour garantir la connectivité des différentes hiérarchies, des niveaux identiques ont été définis. Le premier niveau de la hiérarchie SONET : **STS-1** (*Synchronous Transport Signal - level 1*) ou **OC1** (*Optical Carrier-1*) est défini à 51,84 Mbit/s. La hiérarchie SDH fixe un premier niveau (ou trame de base) à 155,52 Mbit/s (**STM-1**, *Synchronous Transport Module - level 1*). Le tableau de la figure 3.7 donne la correspondance entre les deux hiérarchies.

SONET	SDH	Débit en Mbit/s	Accès ATM
OC1		51,84	
OC3	STM-1	155,52	Oui
OC9		466,56	
OC12	STM-4	622,08	Oui
OC18		933,12	
OC24		1 244,16	
OC36		1 866,24	
OC48	STM-16	2 488,32	Oui

Figure 3.7. Correspondance entre SONET et SDH.

La trame de base SDH (figure 3.8) comporte 2 430 octets émis avec une période de récurrence de 125 ms soit un débit de 155,20 Mbit/s. Elle est divisée en neuf éléments ou rangées de 270 octets, chaque élément est divisé en deux champs. Un champ de surdébit de 9 octets par rangée (**SOH**, *Section OverHead*) contient les informations de supervision, notamment les pointeurs. Les données sont déposées dans les champs utiles (261 octets) de chacune des rangées (**AU**, *Administrative Unit*). L'ensemble des données déposées forme un *container*.

Les signaux à transporter proviennent de liaisons, qui peuvent être synchrones ou asynchrones. Pour un transport plus aisé, on les accumule dans un container virtuel VC (*Virtual Container*), comme nous

l'avons déjà vu pour la recommandation SONET. Ce packaging est appelé *adaptation*. Il existe différents containers virtuels pour chaque type de signal à transmettre.

Les liaisons SDH normalisées sont au nombre de trois, correspondant aux STM-1, STM-4 et STM-16. La trame de base est multipliée par 4 dans le deuxième cas et par 16 dans le troisième. Cela correspond à des débits de 622 Mbit/s et 2,488 Gbit/s (les niveaux OC-12 et OC-48 de SONET). Les containers virtuels pour ces niveaux sont les VC-4 et VC-16. Le transport de ces containers sur les trames STM-4 et STM-6 s'effectue par un multiplexage temporel, comme illustré à la figure 3.8, dans laquelle 4 trames VC-4 sont découpées et entrelacées octet par octet.

Rangée	SOH 9 octets	AU 261 octets
1		
2		
3		
4	Pointeur	Données
5		Données
6		Données
7		Données
8		Données
9		

Figure 3.8 Structure simplifiée de la trame SDH.

b) Les équipements SDH

La hiérarchie synchrone met en oeuvre trois types d'équipements (figure 3.8) :

- Les **multiplexeurs d'accès** permettent le multiplexage et le démultiplexage de plusieurs affluents plésiochrones et/ou synchrones.
- Les **multiplexeurs à insertion/extraction** (**ADM**, *Add Drop Mux*) assurent le transfert des données d'Est en Ouest ($E \leftrightarrow W$) tout en autorisant l'extraction et/ou l'insertion de sousdébit.
- Les **brasseurs numériques** (**DXC**, *Digital Cross Connect*) modifient l'affectation des flux d'information entre un affluent d'entrée et un affluent de sortie. Le croisement de flux est défini par l'opérateur, il est permanent.

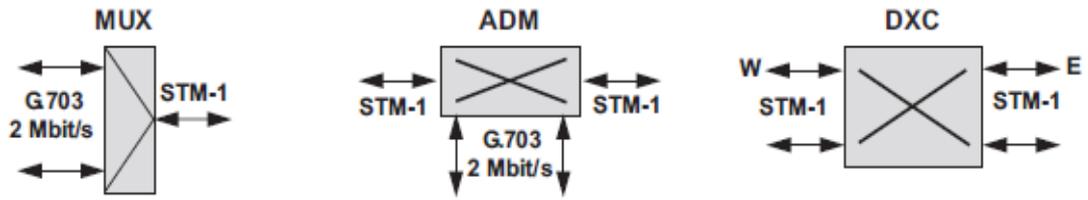


Figure 3.8. Les équipements SDH.

Le multiplexage des différents affluents d'ordre N vers un affluent d'ordre $N+1$ est réalisé par entrelacement d'octets (figure 3.9).

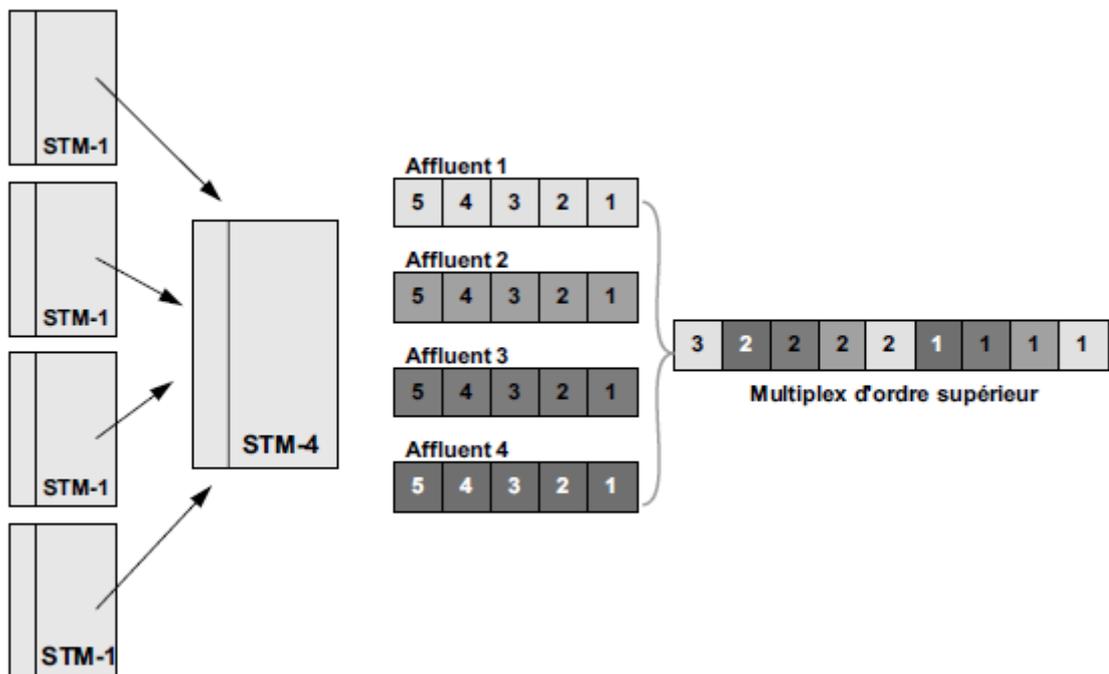


Figure 3.9. Principe du multiplexage d'octets.

L'entrelacement temporel d'octets permet d'une part, en répartissant les erreurs, d'en améliorer la détection et, d'autre part de faciliter l'extraction/insertion, il n'est pas nécessaire d'attendre la réception complète de l'affluent pour débiter son insertion/extraction dans le multiplex d'ordre supérieur/inférieur. Un autre avantage des infrastructures SDH concerne les mécanismes de sécurisation automatique qui permettent le rétablissement du trafic dans des délais d'environ 50 ms. Ce mécanisme, dit

d'autocicatrisation (APS, Automatic Protection Switching), est basé sur l'utilisation d'informations de supervision contenues directement dans l'en-tête SDH (surdébit de section, SOH).

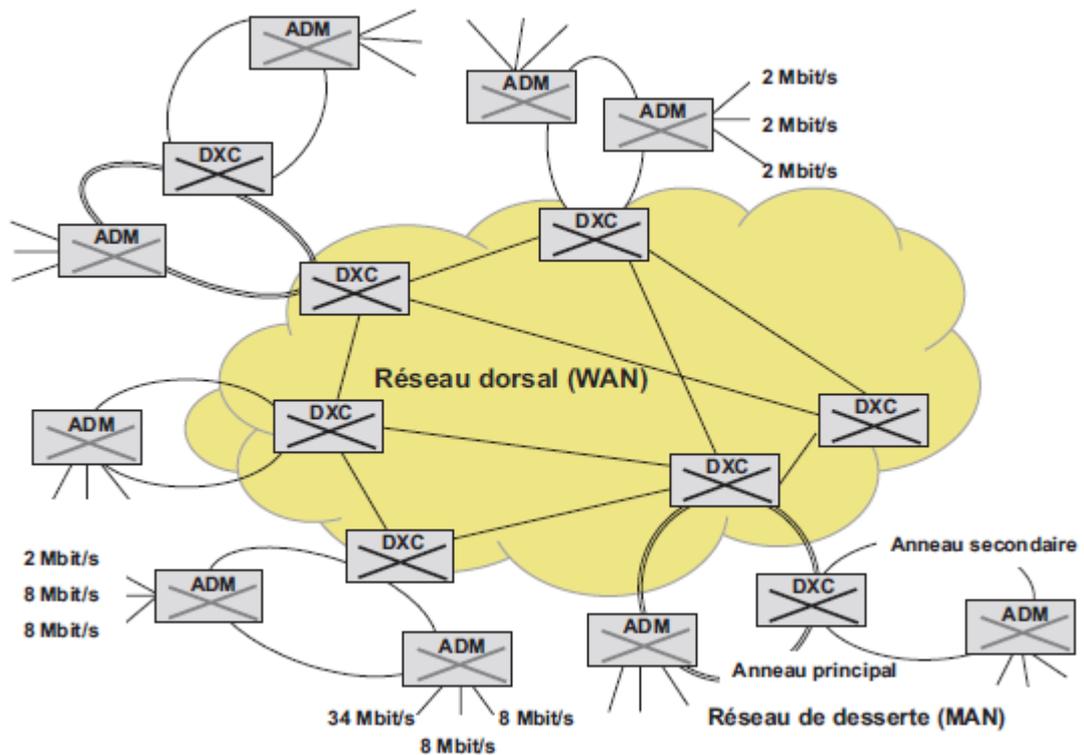


Figure 3.10. Principe d'un réseau SDH.

3.2. LE PLAN DE SERVICE

Le plan de service (figure 3.11) correspond au réseau de transport de données. L'interconnexion des installations locales de l'utilisateur est réalisée par le plan service. La figure 3.12 représente le réseau de transport tel que le voit l'utilisateur.

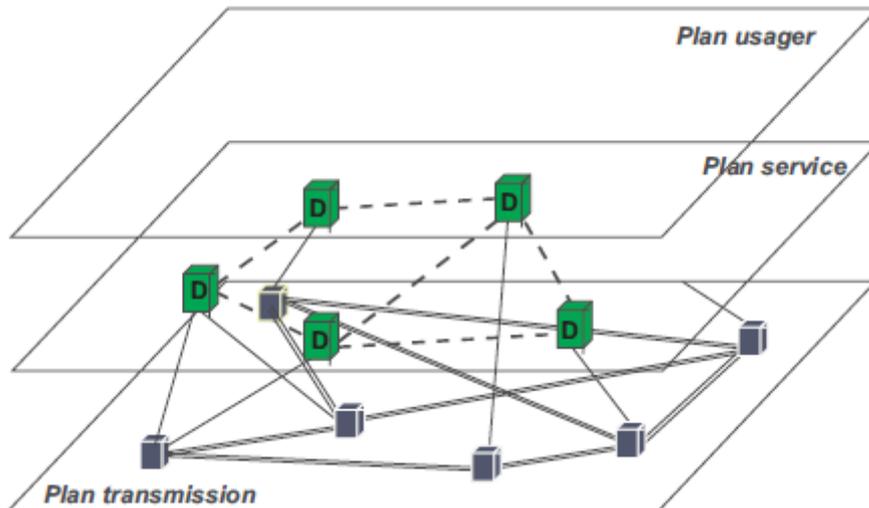


Figure 3.11. Le plan de service.

Au cours des années 70, la recherche de la performance a orienté les concepteurs de réseaux vers la réalisation de réseaux à commutation de paquets (*packet switching*) en mode orienté connexion (**CONS**, *Connection Oriented Network Service*) avec le protocole X.25. Défini au départ comme protocole d'accès, X.25 a très vite évolué vers un protocole de coeur de réseau. Le besoin croissant de bande passante a conduit les opérateurs à rechercher des protocoles internes plus efficaces. À cet effet, les protocoles internes ont d'abord évolué vers le relais de trame (**FR**, *Frame Relay*), puis vers l'**ATM** (*Asynchronous Transfer Mode*).

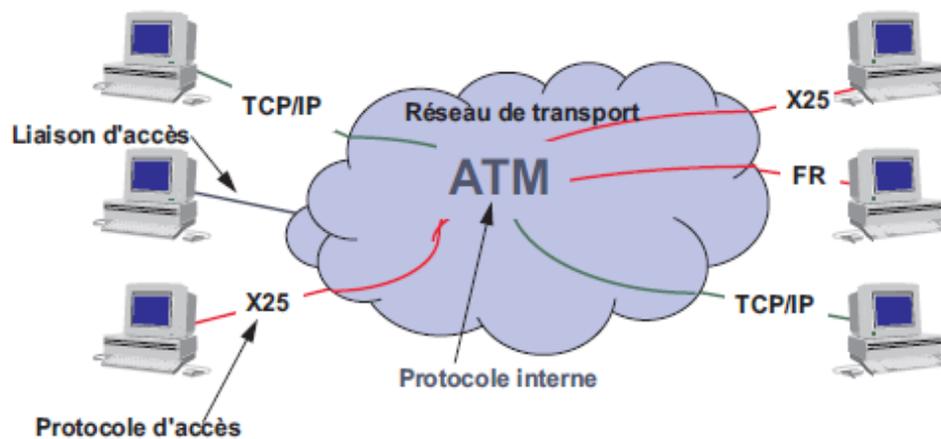


Figure 3.12 Protocoles d'accès et protocole interne.

Cependant, afin de garantir la pérennité des services et de faire bénéficier les usagers des progrès technologiques, les accès X.25 ont été maintenus et des accès FR et TCP/IP ont été offerts (figure 3.13).

Deux modes d'accès aux réseaux publics sont définis :

- Les modes d'accès permanent (*On-line*), l'utilisateur est alors relié au réseau via une ligne dédiée (liaison spécialisée).
- Les modes d'accès temporaire (*Dial-up*), l'utilisateur accède alors au réseau via le réseau téléphonique (RTC ou RNIS).

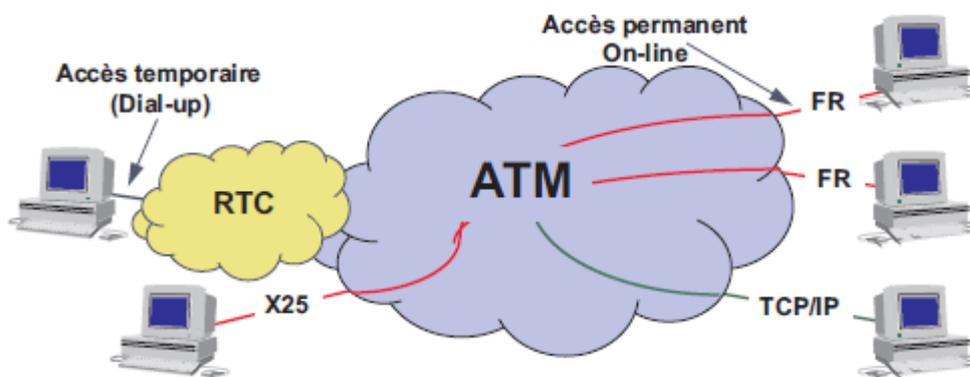


Figure 3.13. Les différents modes d'accès au réseau de transport.

3.2.1. Le protocole X.25

Conçu par les PTT français et britanniques, TCTS (*Trans Canada Telephon System*) et Telnet (USA), le protocole X.25 a été le premier protocole utilisé dans les réseaux publics de données. C'est en décembre 1978 que Transpac (filiale de France Télécom) a ouvert le premier réseau mondial public de transmission en mode paquets X.25 (**PSPDN**, *Packet Switched Public Data Network*). L'avis **X.25** adopté en septembre 1976 par le CCITT (UIT-T) définit les protocoles d'accès au réseau, c'est-à-dire le protocole entre l'ETTD (DTE) et le réseau (ETCD ou DCE dans la norme X.25). Le protocole X.25 couvre les trois premières couches du modèle OSI (figure 3.14) :

- La couche physique, niveau bit ou X.25-1 définit l'interface ETTD/ETCD. Elle est conforme à l'avis X.21 et X.21 bis de l'UIT-T.
- La couche liaison, niveau trame ou X.25-2, met en oeuvre un sous-ensemble d'HDLC appelé LAP-B (*High Level Data Link Control, Link Access Protocol Balanced*).
- La couche réseau, niveau paquet ou X.25-3, gère les circuits virtuels (permanents ou commutés).

Si un ETTD peut communiquer simultanément, sur une même liaison d'abonné, avec plusieurs sites distants, l'accès au réseau est dit multivoie, dans le cas contraire, l'accès est dit **univoie** ou **monovoie**.

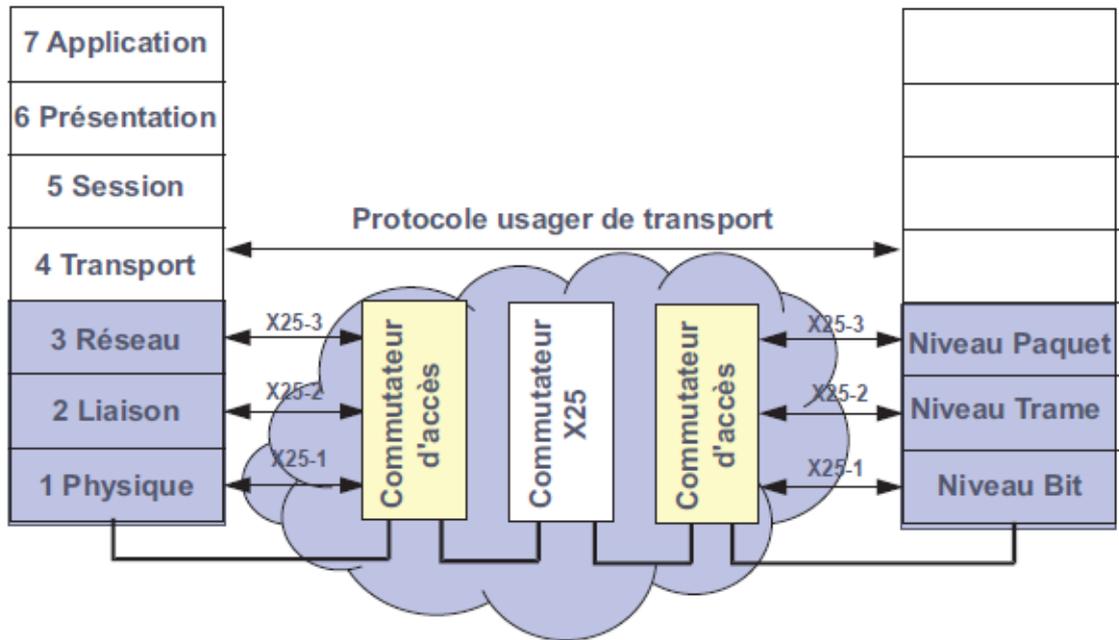


Figure 3.14 Architecture du protocole X.25.

Rappelons que X.25 ne concerne que l'accès au réseau. Le réseau de transport peut utiliser, dans le réseau interne, un protocole différent.

a) Le niveau X.25-1

La recommandation X.25 spécifie que l'accès au réseau X.25 doit être conforme à l'une des recommandations X.21 (transmission numérique), X.21 bis (transmission analogique) ou X.31 (accès via le RNIS). L'avis X.21 définit l'interface d'accès entre un ETTD et un réseau public de transmission de données (figure 3.15), il fixe les règles d'échange pour :

- L'établissement de la connexion avec un ETTD distant à travers un ou plusieurs réseaux.
- L'échange des données en mode duplex intégral.
- La libération de la connexion.

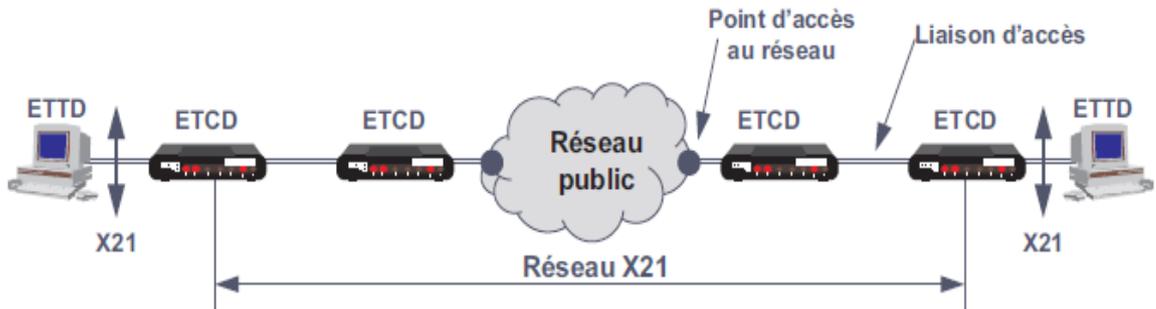


Figure 3.15. *Le réseau X.21.*

b) Le niveau X.25-2

Le niveau 2 du modèle OSI, ou couche liaison, garantit un transfert fiable de données sur une liaison physique non fiable (perturbations électromagnétiques). Au niveau trame, X.25-2 met en œuvre le protocole HDLC LAP-B (*Link Access Protocol Balanced*). LAP-B est un protocole point à point en duplex intégral (*full duplex*), dans lequel les deux stations communicantes ont une responsabilité égale vis-à-vis de la liaison, chacune des extrémités pouvant émettre une commande. L'une des stations est l'ETTD (DTE), l'autre le nœud de rattachement au réseau ou ETCD (DCE) (en X.25, le réseau ou son point d'accès est assimilé au DCE). La figure 3.16 schématise le principe d'une liaison équilibrée.

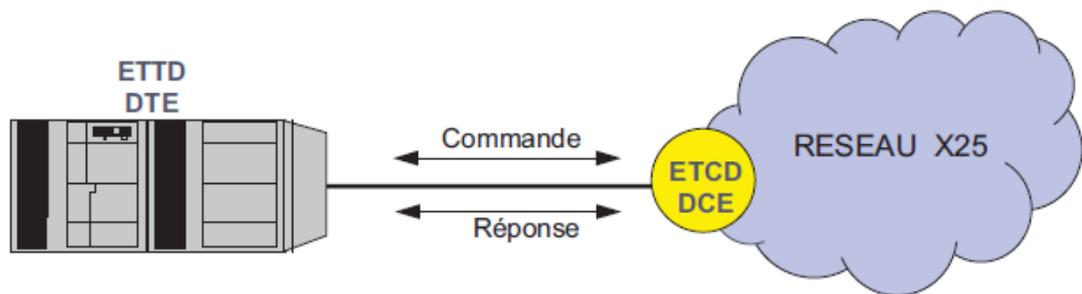


Figure 3.16. *Liaison point à point en LAP-B.*

L'accès au réseau peut utiliser un seul lien physique (**SLP**, *Simple Link Protocol*) ou, pour accroître le débit, une agrégation de plusieurs liens (**MLP**, *Multi Link Protocol*). L'utilisation de MLP est transparente pour le niveau réseau, avec l'évolution des débits l'utilisation du protocole MLP est tombée en désuétude.

c) Le niveau X.25-3

La recommandation X.25-3 (**X.25 PLP**, *Packet Level Protocol*) gère l'établissement, le maintien et la libération des circuits virtuels (**CVC**, Circuit Virtuel Commuté ou **SVC**, *Switched Virtual Circuit*). Elle résout les problèmes d'adressage et de multiplexage des connexions virtuelles sur la même liaison d'abonné. Le protocole X.25-3 assure le transfert de données, le contrôle de flux, la fragmentation et le réassemblage des paquets.

La procédure d'établissement des CVC établit une relation entre un numéro de voie entrante d'une part et le numéro de voie sortante d'autre part. Cette relation correspond à un lien virtuel entre les entités connectées (connexion virtuelle) similaire à la constitution d'un circuit en commutation de circuits. Le mode de mise en relation est dit orienté connexion. Ce procédé (figure 3.17) qui identifie une liaison, autorise le multiplexage des connexions sur une même voie physique et l'utilisation d'un adressage abrégé : le Numéro de Voie Logique (**NVL**).

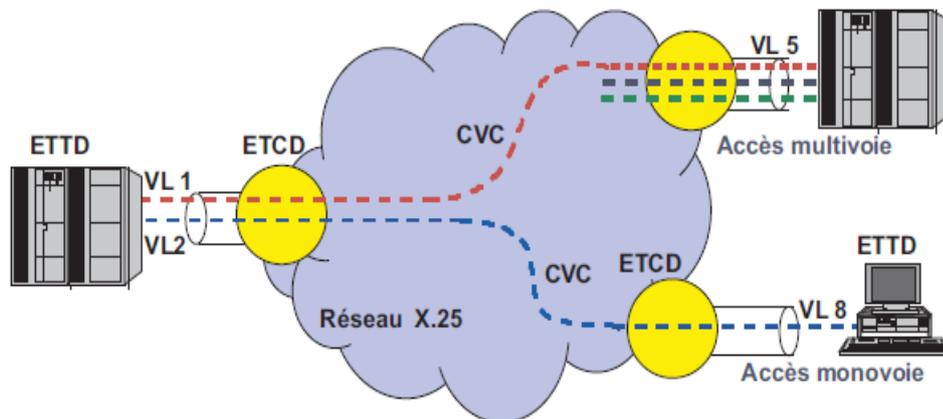


Figure 3.17. Mise en relation d'abonnés.

➤ Format des unités de données

Les paquets X.25-3 comportent les informations relatives à l'adressage : le numéro de voie logique utilisée (adressage de convention), des informations de contrôle et éventuellement des données. Les paquets sont transmis à la couche trame qui les encapsule (figure 3.18).

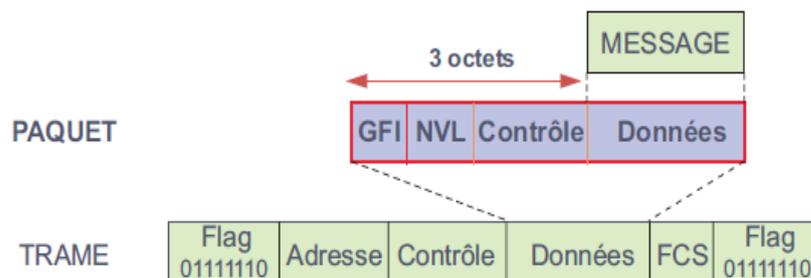
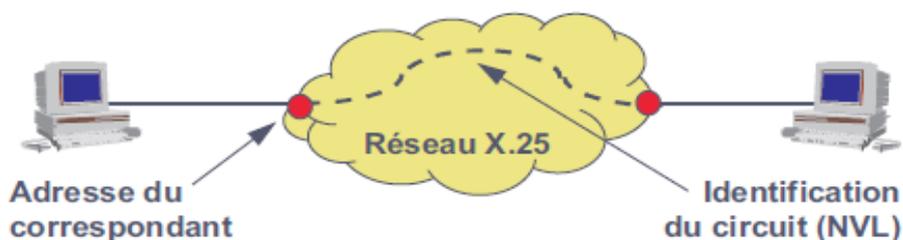


Figure 3.18. *Format de la trame X25.*

Un paquet X.25, illustré sur la figure 3.18, comporte au moins 3 octets. Le premier champ de 4 bits, dit champ **GFI** (*General Format Identifier*) définit certains paramètres de l'échange. Le champ suivant identifie la voie logique (étiquette) : le **NVL** ou Numéro de Voie Logique sur 12 bits (4 096 voies logiques identifiables) n'a qu'une signification locale.

➤ Gestion des circuits virtuels

Les réseaux X.25 autorisent les deux types de circuits virtuels, les circuits virtuels commutés (CVC ou SVC) et les circuits virtuels permanents (CVP ou PVC, *Permanent Virtual Circuit*). La figure 3.19 rappelle les différences essentielles entre ces deux modes de mises en relation.



	Circuit Virtuel Commuté	Circuit Virtuel Permanent
Etablissement du circuit	A chaque appel	A l'abonnement
Potentialité de communication	Possibilité de mise en relation avec tout abonné	Liaison point à point
Temps d'établissement	Peut être long (1s)	Sans (Liaison permanente)

Figure 3.19. *Différences entre un CVC et un CVP.*

3.2.3. LE RELAIS DE TRAME OU FRAME RELAY

Le relais de trames apporte une simplification supplémentaire à la commutation de trames. Dans les nœuds intermédiaires, les trames sont vérifiées grâce à une zone de détection d'erreur et détruites si une erreur est détectée. En revanche, il n'y a pas d'algorithme pour effectuer la récupération de la trame perdue. Les nœuds de commutation ne prennent donc en charge que les trames valides. La retransmission des trames erronées est effectuée par le nœud de sortie du réseau en demandant une retransmission à l'autre extrémité du réseau. Cette solution permet de simplifier énormément les nœuds intermédiaires et d'atteindre des capacités de transmission se chiffrant en mégabit par seconde. Elle n'est toutefois viable que si le taux d'erreur est faible puisque les retransmissions sont beaucoup plus lentes que dans une reprise de nœud à nœud, comme cela se produit dans un transfert de niveau 3.

Le relais de trames offre un service réseau en mode connecté conforme à l'avis Q.922 de l'UIT-T. La signalisation est du type canal sémaphore conforme à l'avis Q.933 (évolution de l'avis Q.931).

Le relais de trame établit entre les équipements d'extrémité (**FRAD**, *Frame Relais Access Device*). Elle établit un service de liaison virtuelle (figure 3.20.). La liaison virtuelle peut être du type permanent (PVC, *Permanent Virtual Circuit*) ou temporaire et établi à la demande (SVC, *Switched Virtual Circuit*).

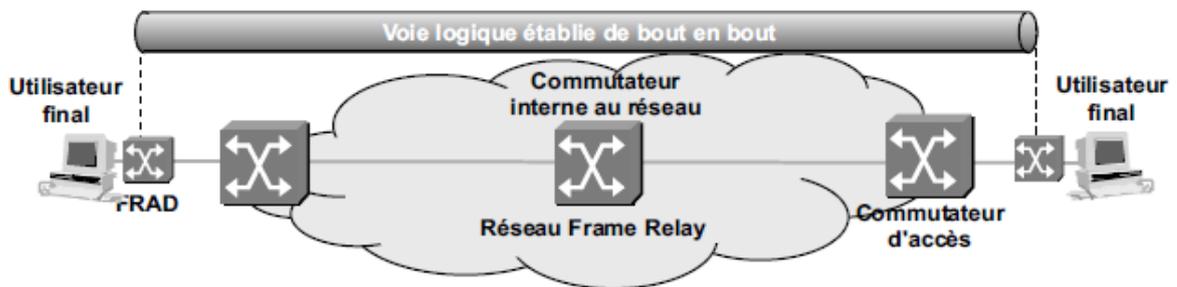


Figure 3.20. La liaison virtuelle du relais de trames.

Le relais de trames couvre les couches 1 et 2 du modèle OSI (figure 3.21), mais n'est pas conforme à ce dernier (modèle en plan de l'UIT). La couche physique assure l'adaptation au support physique.

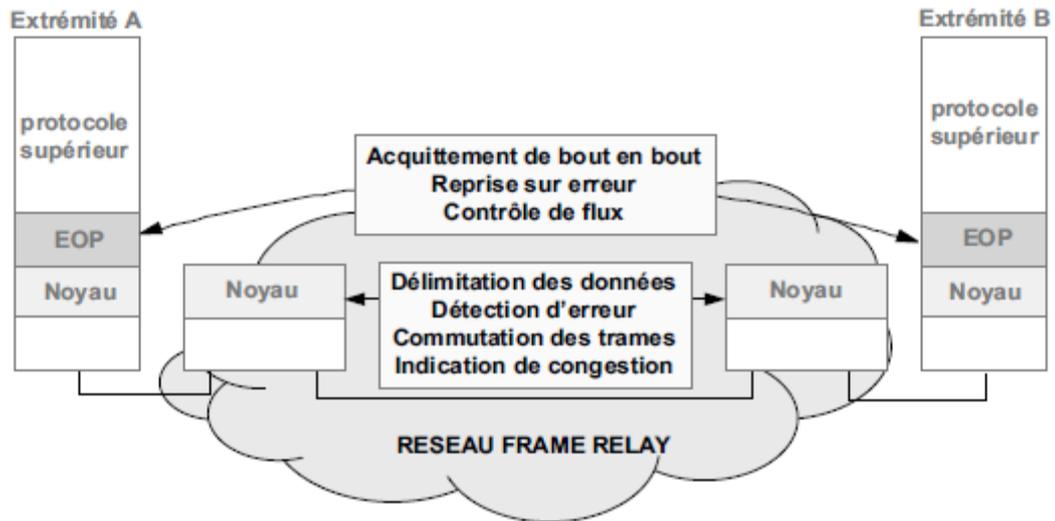


Figure 3.21. L'architecture du relais de trames.

La couche 2 est subdivisée en deux sous-couches : le noyau (*Core*) et une sous-couche (**EOP**, *Element of Procedure*) complémentaire et facultative. Non normalisées, ses fonctionnalités sont laissées à la discrétion de l'utilisateur. Cette sous-couche 2 supérieure peut, par exemple, être HDLC LAP-B.

a) trame Frame Relay

La trame a le même format (figure 3.22) que celui défini dans le protocole de liaison de données HDLC (High-level Data Link Control) [IS 3309]. Une trame est considérée comme valide lorsqu'elle est délimitée par les drapeaux "01111110" et qu'elle comporte au moins cinq octets, hors drapeaux, soit au moins un octet d'information. La longueur d'une trame est variable et au maximum de 2 048 octets. La transparence au drapeau est faite par insertion d'un zéro après toute série de cinq "1" consécutifs.

0	1	1	1	1	1	1	0
DLCI (MSB)				C/R	EA		
DLCI (LSB)		FE CN	BE CN	C/R	EA		
user data							
FCS (MSB)							
FCS (LSB)							
0	1	1	1	1	1	1	0

Figure 3.22. Format de la trame Frame Relay

Les différents champs de la trame ont la signification suivante :

- **DLCI** (Data Link Connection Identifier) permet d'identifier la trame ou le circuit virtuel. Le codage est réalisé sur 10 bits, donnant 1 024 valeurs possibles, dont certaines sont réservées ;
- le bit **CR** (Command/Response) n'est pas utilisé par le protocole ; il est simplement transféré entre les utilisateurs du service de relais de trames et leur permet de distinguer une trame de commande d'une trame de réponse ;
- les bits **EA** (Extended Address) servent à délimiter le champ d'adresse (EA = 0 dans le deuxième octet et EA = 1 dans le troisième) ; une valeur à 0 indique que l'octet suivant fait partie du **DLCI**, une valeur à 1 indique que l'octet courant est le dernier du **DLCI** ;
- le bit **BECN** (Backward Explicit Congestion Notification) est positionné à 1 par le réseau pour indiquer à l'émetteur que les trames qu'il pourrait émettre vont traverser un réseau encombré ;
- le bit **FECN** (Forward Explicit Congestion Notification) est mis à 1 par le réseau pour indiquer au récepteur que les trames qu'il reçoit ont traversé un réseau encombré ;
- le bit **DE** (Discard Eligibility) est mis à 1 pour indiquer qu'en cas de congestion cette trame peut être rejetée ;
- le champ **User Data** correspond au champ d'information transmis ; il n'est pas interprété par le protocole de relais de trames (excepté le CV dédié au LMI (Local Management Interface)) ;
- le champ **FCS** (Frame Check Sequence) contient sur deux octets la séquence de contrôle d'erreur calculée sur tous les bits de la trame, hormis les drapeaux et le FCS.

3.2.4. LE RNIS

La numérisation du réseau nécessite une conversion analogique/numérique en entrée du réseau et numérique/analogique en sortie. Un usager qui désire utiliser n communications téléphoniques simultanées doit être raccordé par n lignes (lignes groupées, les lignes groupées sont vues, pour le réseau, sous un même numéro). La numérisation autorise le multiplexage, d'où l'idée de réaliser des liaisons numériques de bout en bout, une seule ligne physique peut alors acheminer plusieurs communications téléphoniques (figure 3.23).

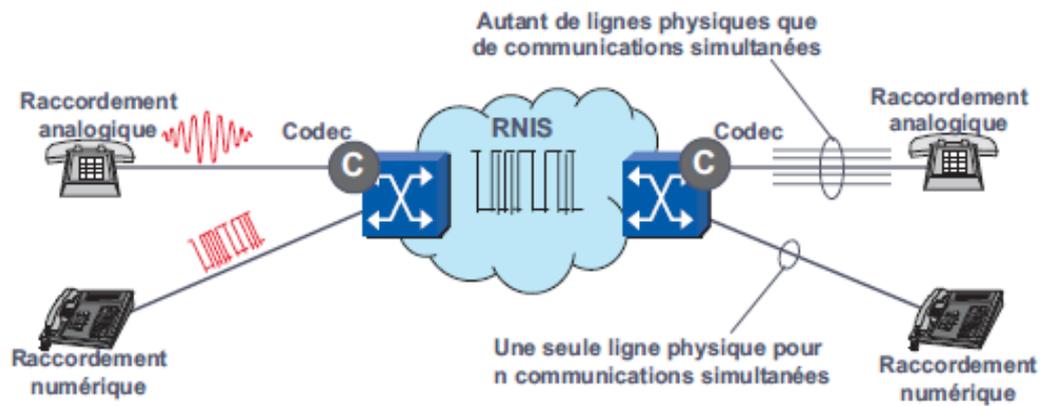


Figure 3.23. De l'analogique au numérique.

En réservant un IT (Intervalle de Temps) à la signalisation (débit de 64 kbit/s), on peut acheminer celle-ci en mode messages via un protocole de haut niveau. De ce fait, la signalisation peut être enrichie et autoriser de nombreux services nouveaux, c'est le **RNIS** (Réseau Numérique à Intégration de Service ou **ISDN**, *Integrated Service Digital Network*). Le RNIS est une approche service du réseau devenu alors le réseau unique qui permet, à partir d'un seul raccordement, de disposer à la fois de services voix (téléphonie), vidéo (visiophonie, téléconférence), de transmission de données en mode paquets ou autre et de la transmission de l'écrit (télécopie). La figure 3.24 schématise cette évolution, en RNIS, si un télécopieur initialise un appel, seul le télécopieur de l'installation destination « sonne ». Le raccordement de terminaux différents (voix, données, images) sur une même ligne nécessite une signalisation spécifique et enrichie qui permette, à la fois, l'identification du terminal

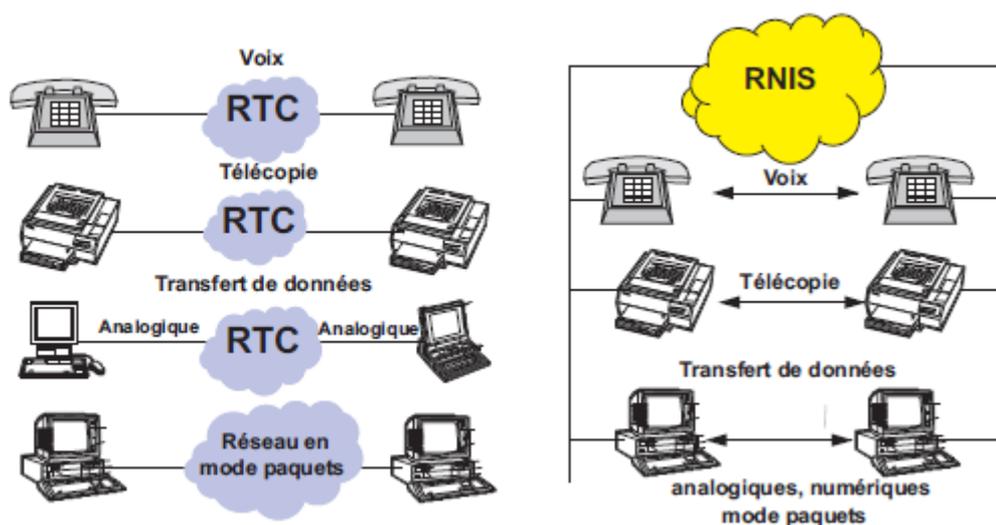


Figure 3.24. Évolution des accès avec le concept RNIS.

et le type de service requis. C'est ainsi, que le RNIS distingue les canaux de transmission (transport) de données ou canaux B établis appel par appel (circuits commutés), du canal de signalisation ou canal D établi de manière permanente et transportant les informations nécessaires à l'établissement du circuit (adresse, type de service invoqué...).

Lors de l'émission d'un appel, celui-ci est pris en compte par le protocole de signalisation. La demande d'établissement de circuit est acheminée en dehors de toute communication établie.

Elle transporte les informations en relation avec le numéro de l'appelé, le type de service invoqué (l'appel émis à partir du télécopieur de l'appelant invoquera un service de télécopie chez l'abonné distant. Seul alors un télécopieur répondra à cet appel. Le téléphone de l'installation a bien reçu l'appel, mais non concerné par le service invoqué ne sonne pas.

Un terminal RNIS utilise deux connexions : une connexion commutée à un canal B (*Bearer channel*) utilisé pour le transport d'informations utilisateur à 64 kbit/s (voix, données et images) et une connexion permanente sur le canal de signalisation (canal D, *Data channel*) de 16 ou 64 kbit/s. Des débits plus importants peuvent être obtenus par agrégation de plusieurs canaux B, on parle alors de canaux H (*High speed channel*) qui offrent un débit de 384 kbit/s (H0), 1 536 kbit/s (H11) ou de 1 920 kbit/s (H12). La figure 15.16 illustre le principe de raccordement d'un terminal au réseau RNIS.

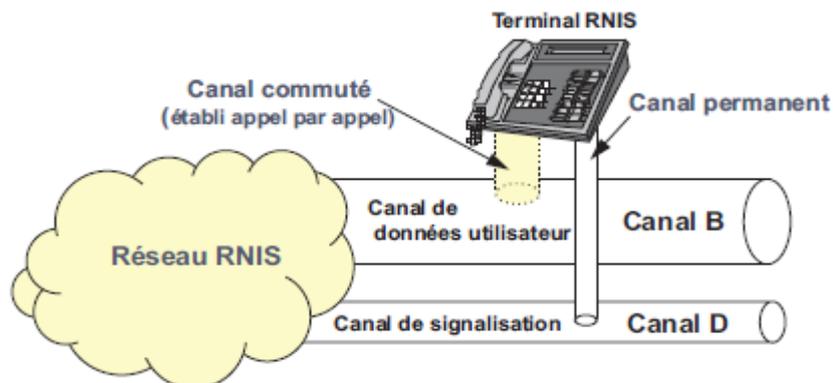


Figure 3.25. Connexions d'un terminal RNIS.

3.2.5 Le réseau ATM

3.2.5.1 Principe

L'ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) est une technique de transmission commutée faisant appel à des paquets courts de tailles fixes appelés cellules. Dans les commutateurs, le traitement de ces cellules est limité à l'analyse de l'en-tête pour permettre leur acheminement.

L'ATM combine les avantages de la commutation rapide de paquets et du multiplexage temporel asynchrone :

- la station source et le réseau ne sont pas liés par la nécessité d'émettre ou de recevoir une quantité d'information en synchronisme avec une trame de durée fixe ;
- la commutation est indépendante de la nature des informations véhiculées (voix, données, images) et un débit minimum peut être garanti ;
- la cellule a une taille fixe, ce qui permet de concevoir des commutateurs relativement simples et performants ;
- la cellule a une taille courte (53 octets), ce qui permet l'adaptation à différents types de trafics avec une gigue réduite (variation des intervalles de temps entre cellules).

De base ATM est orienté connexion. Les connexions sont établies pour toute la durée des échanges par l'allocation d'un chemin virtuel (voix virtuelle ou conduit virtuel). Les fonctions de contrôle de flux ou de traitement des erreurs ne sont pas effectuées dans le réseau ATM, mais laissées à la charge des applications utilisatrices ou des équipements d'accès. Ces caractéristiques permettent à l'ATM de répondre aux contraintes de trafics aussi différents que la voix, la vidéo numérique ou les données. Ce mode de transfert universel rend possible l'intégration de tous types de services sur un accès unique au réseau. D'abord conçu et sélectionné par l'UIT-T pour être la solution technique des réseaux publics large bande (à la place des réseaux Transpac et RNIS en France), l'ATM était également prévu pour être utilisé sur les LAN. Cependant sa complexité et son manque d'interopérabilité avec les réseaux IP ont freiné son implantation au profit de techniques plus universelles comme MPLS. Aujourd'hui, ATM subsiste essentiellement dans les réseaux de collecte des liaisons ADSL.

3.2.5.2 Architecture

La commutation de cellules d'ATM est basée sur un modèle en trois couches (figure 3.26) :

- la couche **AAL** (*ATM Adaptation Layer*) adapte les flux d'information à la structure des cellules et fait le lien avec les couches applicatives ;
- la couche **ATM** assure la commutation et le multiplexage des cellules ;
- la couche **Physique** ou **PMD** (*Physical Medium Dependent*) assure l'adaptation au support utilisé avec un codage suivant le débit utilisé (155 et 622 Mbit/s).

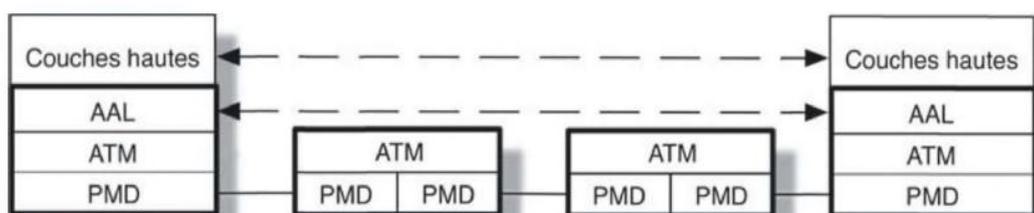


Figure 3.26. Couches ATM.

3.2.5.3 La couche ATM

Cette couche a pour rôle de convertir les flux de données en cellules et de gérer la commutation et le multiplexage de celles-ci. Le trafic utile (voix, vidéo, images et données) est encapsulé dans les cellules de 53 octets pour être véhiculé sur le réseau.

a) Structure des cellules

La cellule a une longueur de 53 octets et contient deux champs principaux (figure 3.27) :

- l'en-tête sur 5 octets dont le rôle principal est d'identifier les cellules appartenant à une même connexion et d'en permettre l'acheminement ;
- le champ de données sur 48 octets correspondant à la charge utile.

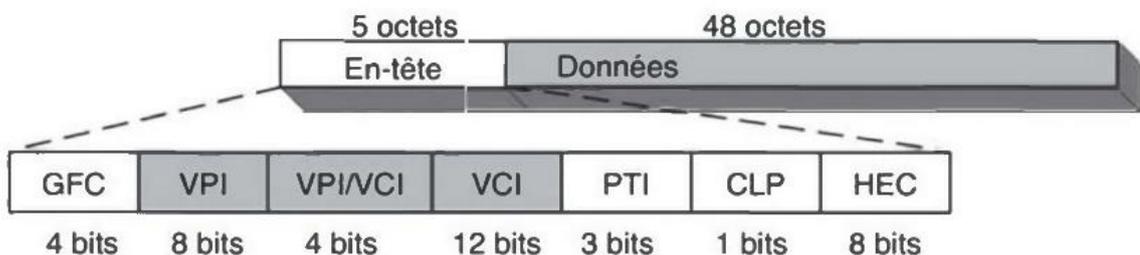


Figure 3.27. Structure des cellules ATM.

L'en-tête comporte les champs suivants :

- un champ de contrôle de flux (GFC, *Generic Flow Control*) dont la définition n'est pas arrêtée ;
- trois octets sont utilisés pour l'identificateur logique (VPI, *Virtual Path Identifier* et VCI, *Virtual Channel Identifier*) ;
- trois bits sont consacrés à la définition du type de la charge utile (PTI, *Payload Type Identification*) et permettent de définir s'il s'agit d'informations utilisateur (indication de congestion, données de type 0 ou 1) ou de messages de service du réseau (maintenance, gestion des ressources du réseau) ;
- un bit de référence à l'écartement (CLP, *Cell Loss Priority*) mis à 1 dans les cellules transportant des données de moindre importance pouvant être rejetées en cas de congestion du réseau ;
- un octet pour la détection des erreurs et la correction des erreurs simples portant sur l'en-tête (HEC, *Header Error Check*) et gérée par la couche physique.

b) Fonctions de la couche ATM

La couche ATM assure quatre fonctions essentielles :

- la commutation consistant en un traitement sur l'en-tête de la cellule (champs VPI et VCI). Ces champs sont soit insérés soit extraits et traduits afin d'aiguiller correctement la cellule ;

- le multiplexage-démultiplexage des cellules consistant principalement en une gestion de files d'attente ;
- l'extraction ou l'ajout de l'en-tête devant le champ d'information avant de le transmettre à la couche d'adaptation AAL ou à la couche physique ;
- un mécanisme de contrôle de flux peut être implémenté par l'intermédiaire du champ GEC, pour l'interface utilisateur-réseau.

La figure 3.28 montre un exemple de multiplexage temporel asynchrone des flux. Les cellules correspondant à des applications plus ou moins prioritaires (voix, vidéo, données) sont transmises au rythme du débit engendré par l'application. L'échange avec le réseau est donc **asynchrone** et la station source seule gère son débit en fonction des paramètres définis en début de communication (*bandwidth on demand*) autorisant la Qualité de Service (*Quality of Service*) de la transmission de bout en bout.

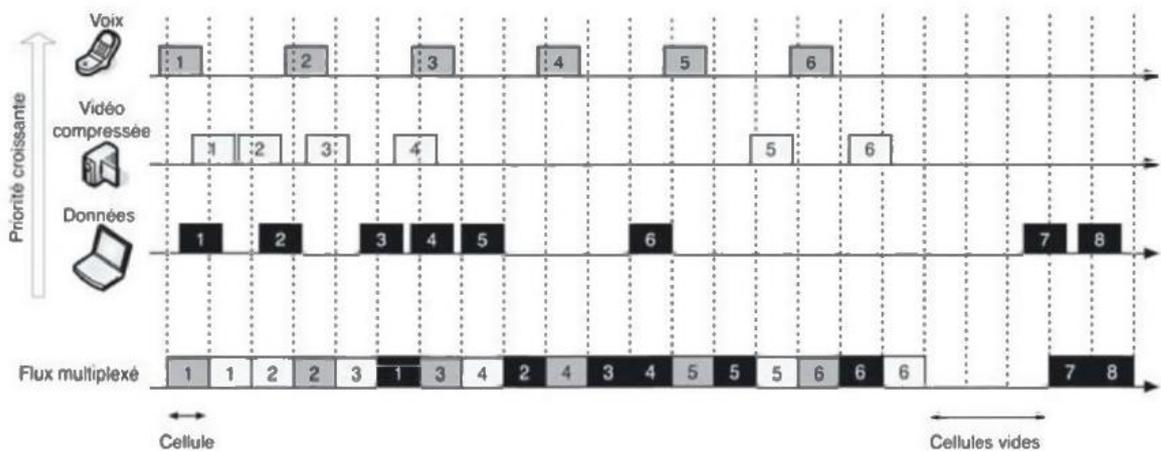


Figure 3.28. Multiplexage temporel asynchrone des flux.

3.2.5.4 Connexions ATM

a) Principe de la connexion virtuelle

L'acheminement des cellules dans le réseau large bande se fait par établissement préalable d'une connexion de voie virtuelle (VCC — Virtual Channel Connection) de bout en bout entre les intervenants de la communication (source et destinataire). Par abus de langage, nous appelons simplement connexion virtuelle, la connexion de voie virtuelle. Une connexion virtuelle ATM est une concaténation de tronçons de voie virtuelle (VCL — Virtual Channel Link) juxtaposés. Un tronçon de voie virtuelle est défini sur un lien entre deux nœuds. Le protocole d'établissement consiste à choisir le chemin que doit emprunter la connexion virtuelle dans le réseau en fonction de ses besoins en bande passante, de sa destination finale et

des ressources disponibles. Une fois la connexion établie, les cellules transmises sont transférées en séquence sur le chemin tracé. Le protocole d'établissement d'une connexion ATM fait partie du plan de signalisation. Les connexions sont de bout en bout et peuvent être point à point ou point à multipoint (d'ores et déjà pour les spécifications de l'ATM Forum et à partir de la phase 2, selon le planning établi par l'UIT-T), unidirectionnelles ou bidirectionnelles (dans ce dernier cas, symétriques ou asymétriques en termes de bande passante).

b) Translation des valeurs de VCI

La connexion virtuelle est identifiée sur chaque tronçon de voie virtuelle par un identificateur de voie virtuelle appelé VCI (Virtual Channel Identifier). Cet identificateur ainsi que le lien emprunté sont enregistrés au moment de l'établissement, dans chaque nœud traversé par la connexion, dans une table de translation.

Prenons comme exemple une connexion virtuelle unidirectionnelle de bout en bout établie entre deux terminaux utilisateur A et B. Quand A demande la connexion à B, le réseau initialise le VCI à la valeur *a*. Les cellules transmises par A seront donc étiquetées avec un VCI égal à *a*. D'autre part, le réseau affecte la valeur *z* à la connexion arrivant en B (figure 3.29).

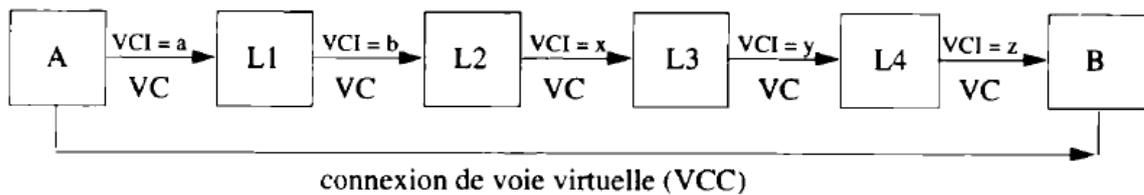


Figure 3.29. Exemple de connexion virtuelle

Les valeurs des VCI en entrée et en sortie du commutateur sont enregistrées avec les informations de routage dans une table de translation. Lors de la commutation d'une cellule, le commutateur effectue la translation des valeurs de VCI en même temps qu'il route la cellule sur le lien adéquat en sortie. En reprenant l'exemple de la figure 3.29, une connexion virtuelle provenant du lien de A et identifiée *a* sera commutée vers le nœud L 2 et portera le VCI *b* sur ce lien (figure 3.30). Le nouveau VCI servira à la prochaine unité de commutation rencontrée par la cellule. A l'entrée du nœud L 1 , la cellule arrive sur le port A avec le VCI *a* et sort sur le port L 2 avec le VCI *b*.

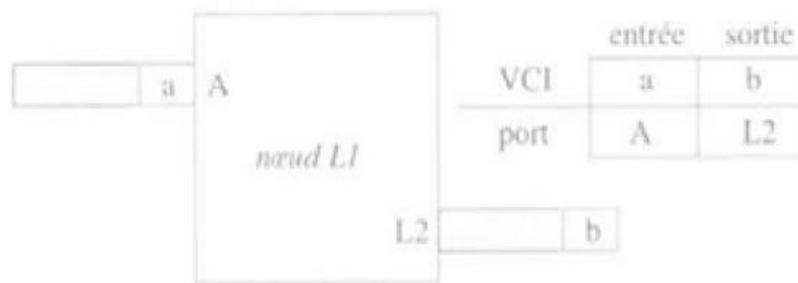


Figure 3.30. Translation des valeurs de VCI au nœud L1

Comme plusieurs dizaines de milliers de connexions virtuelles peuvent traverser un commutateur, la table de translation peut occuper un espace mémoire considérable et le temps de recherche à l'intérieur de la table devenir important. Pour pallier cet inconvénient, les connexions virtuelles de l'utilisateur sont multiplexées dans des connexions de conduit virtuel (VPC — Virtual Path Connection) que nous appelons par abus de langage, conduit virtuel.

c) Le conduit virtuel

Une connexion de conduit virtuel (VPC — Virtual Path Connection) contient des faisceaux de voie virtuelle qui sont commutés ensemble comme une seule unité (figure 3.31). De la même manière que pour la voie virtuelle, la connexion de conduit virtuel est composée d'une concaténation de tronçons de conduit virtuel (VPL — Virtual Path Link) juxtaposés. La connexion de conduit virtuel est établie par l'opérateur du réseau de manière permanente. La notion de conduit virtuel est transparente à l'utilisateur



Figure 3.31. Multiplexage des VC et des VP

L'identification d'une connexion virtuelle se fait donc par deux champs de l'entête de la cellule :

- VCI (Virtual Channel Identifier) : l'identificateur de voie virtuelle identifie les connexions allouées dynamiquement. Avec 16 bits, le champ VCI autorise jusqu'à 64 000 connexions de voie virtuelle pour chaque conduit ;

- VPI (Virtual Path Identifier) : l'identificateur de conduit virtuel identifie les connexions statiques (semi-permanentes). Le champ VPI est codé sur 8 ou 12 bits et permet ainsi 256 ou 4 096 conduits virtuels.

d) Commutation à deux niveaux

Le réseau ATM s'organise en deux sous-couches comme le montre la figure 3.32.

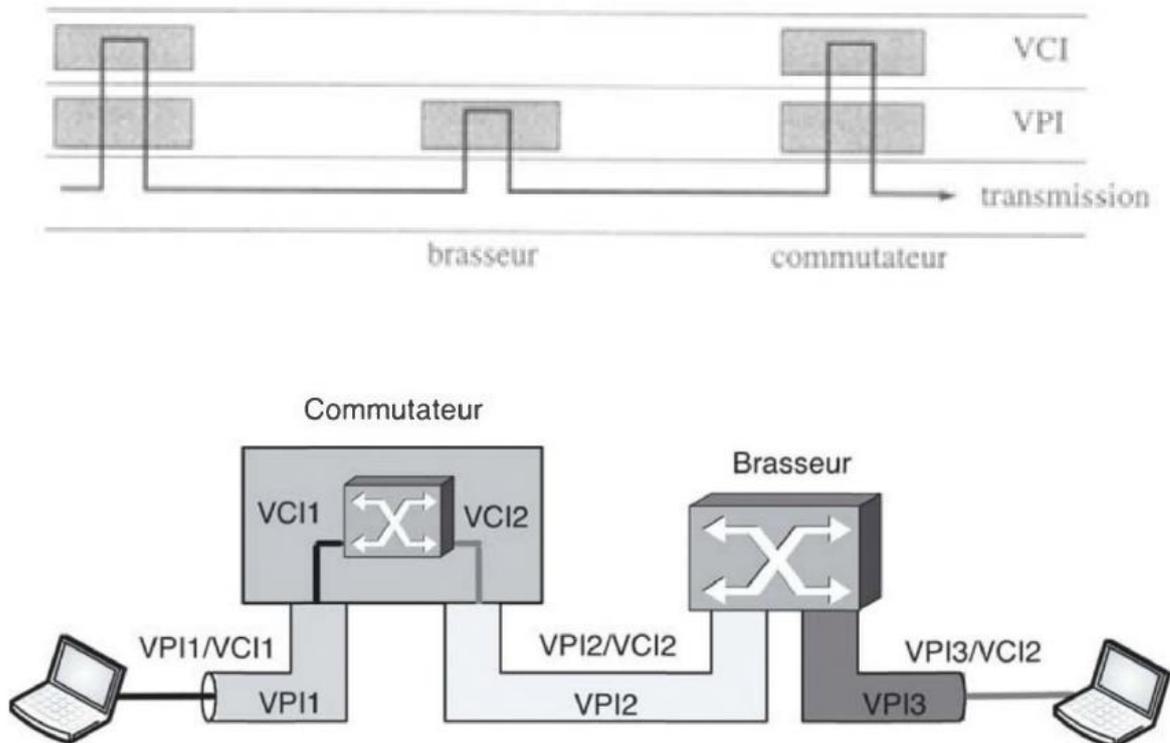


Figure 3.32. Brasseur et commutateur.

A chacune de ces sous-couches correspond un équipement de commutation particulier. Les commutateurs de VP (niveau inférieur) n'examinent que la partie VPI. A ce niveau, toutes les connexions de VC de même VPI sont commutées ensemble. Un tel commutateur est appelé brasseur de conduits. Seule la valeur de VPI y est traduite. Les commutateurs de VC (niveau supérieur) examinent la partie VPI + VCI. La commutation de la cellule est alors réalisée sur la base de la concaténation du VCI et du VPI. Ce type de commutateur termine un tronçon de voie virtuelle et nécessairement une connexion de conduit virtuel.

3.2.6. MPLS

MPLS permet un acheminement commuté de datagrammes. À cet effet, un protocole de distribution d'identifiants de route ou labels prédétermine des routes en établissant une correspondance

entre une destination IP et un label. En fonction de son adresse destination, chaque datagramme en entrée du réseau se voit affecter, par le routeur de périphérie d'entrée (*Edge Label Switching Router* ou **eLSR**), un identifiant de route (label). Il est ensuite acheminé dans le réseau par rapport à cet identifiant et non plus en fonction de l'adresse destination. Comme dans les réseaux en mode connecté, l'identifiant n'a qu'une valeur locale. Le routeur de sortie supprime le label et achemine le datagramme vers sa destination. L'ensemble forme un réseau MPLS (figure 3.33).

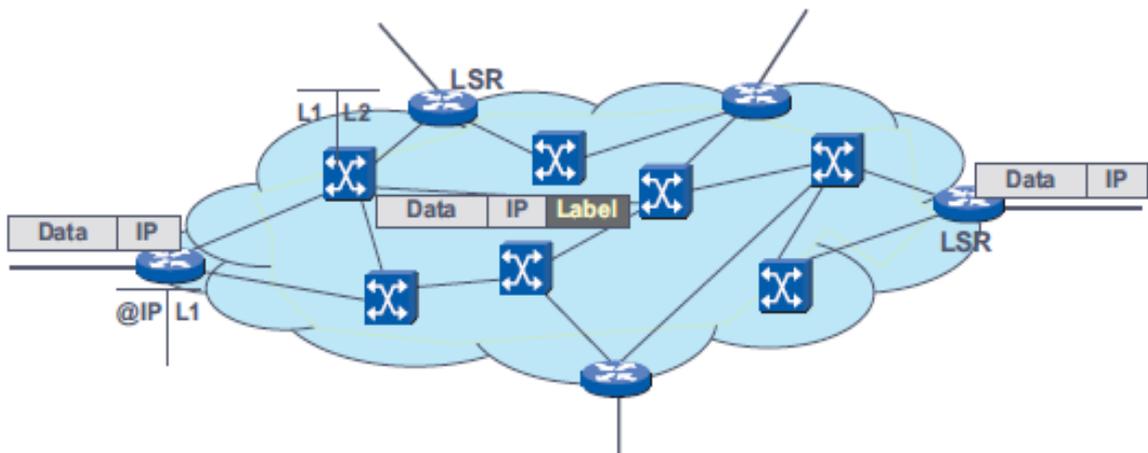


Figure 3.33. *Principe de la commutation MPLS.*

La technologie MPLS permet d'utiliser les anciens réseaux introduisant de la qualité de service, comme ATM. Le passage d'ATM à MPLS ne pose donc pas vraiment de problème. L'avantage de cette solution MPLS est l'utilisation d'un réseau de signalisation fondé sur IP, assez simple à mettre en oeuvre. MPLS peut également utiliser des réseaux Ethernet à partir du moment où Ethernet emploie le mode commuté introduit avec le shim-label.

La figure 3.34 illustre la traversée de plusieurs réseaux spécifiques formant un réseau MPLS afin d'illustrer la transition entre les réseaux de génération ATM et MPLS. La signalisation IP met en place un chemin de la façon suivante :

1. Lorsque le paquet de signalisation arrive au premier nœud, la technique de routage permet de déterminer le routeur suivant à atteindre après la traversée du réseau ATM. La traversée du réseau ATM par la signalisation est classique : un circuit virtuel ATM est ouvert en indiquant l'adresse ATM du routeur suivant, qui est obtenue par une traduction de l'adresse IP en une adresse ATM.
2. Une fois ouvert, le circuit virtuel ATM permet de transporter les différents fragments du paquet de signalisation, qui est reformé au nœud suivant.
3. Les fragments sont réassemblés au routeur suivant grâce à la couche AAL.
4. De nouveau, une fois déterminé le routeur suivant, il faut ouvrir un circuit virtuel ATM pour y transporter le paquet de signalisation IP.

5. De même, pour traverser le réseau Ethernet, un chemin est mis en place, sur lequel les trames Ethernet sont commutées grâce aux références de type shim-label.

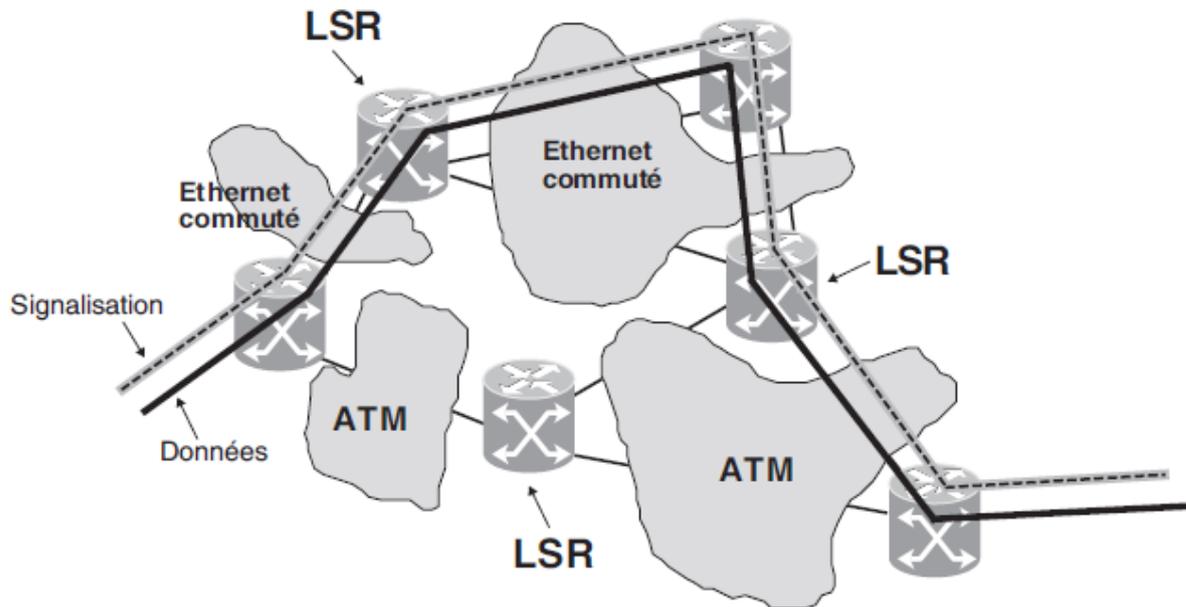


Figure 3.34. Réseau MPLS de transition

3.2.7. La technologie WDM/DWDM

Les réseaux de transport optiques sont composés de nœuds interconnectés par des fibres optiques. Les nœuds assurent les fonctionnalités de multiplexage/démultiplexage, émission, réception et brassage des flux de trafic. Les fibres optiques permettent le transport des flux entre les nœuds d'interconnexion sous forme d'un signal optique. Les réseaux SDH n'envoient qu'un seul canal optique, transportant la trame STM-N, sur chaque fibre. Cela oblige parfois à multiplier les fibres entre deux nœuds pour obtenir la capacité nécessaire au transport de nouvelles demandes.

Le progrès technologique a permis l'émergence de la technique de multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing ou WDM), qui permet de combiner plusieurs canaux sur le même signal optique, chaque canal utilisant une longueur d'onde différente. La bande passante disponible dans une fibre peut être alors considérablement étendue: chaque longueur d'onde permet un débit de plusieurs Gbps et des dizaines de longueurs d'onde sont utilisables. Cette évolution permet d'exploiter une plus large bande passante de la fibre optique que celle qu'utilise un seul émetteur optique dans le cas de SDH. le multiplexage de longueur d'onde (**WDM**). À l'origine, seules les fenêtres courantes de 1 300 et 1 550 nm ont été utilisées autorisant, par exemple, l'exploitation de quatre longueurs d'ondes dans la fenêtre de

1 530 à 1 560 nm (bande C) soit une liaison à 10 Gbit/s (quatre canaux de 2,5 Gbit/s) sur une distance de 250 km. Cette technique est limitée par la dispersion chromatique (différence de coefficient de vélocité en fonction de la longueur d'onde).

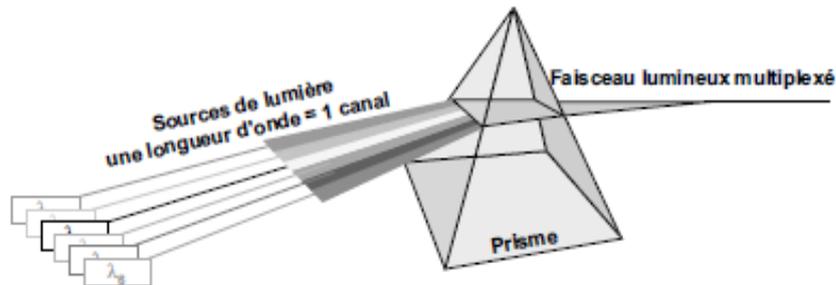


Figure 3.35. Principe du multiplexage de longueur d'onde.

Les réalisations actuelles autorisent le multiplexage de 4, 16 et 32 longueurs d'onde avec des trains numériques incidents de 2,5, 10 voire 40 Gbit/s (figure 3.36). Les technologies du type **DWDM** (Dense WDM) permettent de réduire l'écartement entre les canaux utilisés de 1,6 nm à 0,2 nm et laisse espérer l'utilisation de 1 000 longueurs d'onde dans un même multiplex. Aujourd'hui, on a pu réaliser des liaisons à 3 Tbit/s sur 7 300 km en utilisant 300 canaux à 10 Gbit/s et en laboratoire 10 Tbit/s sur 100 km avec 256 canaux à 40 Gbit/s. La figure 5.17 illustre un système de transmission en multiplexage de longueurs d'onde. Le faisceau lumineux est régénéré par un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium (**EDFA**, *Erbium Doped Fibre Amplifier*). Les pas de régénération sont d'environ 100 km pour les liaisons terrestres et de 50 à 80 km pour les liaisons océaniques. Une liaison terrestre de 450 km à 160 Gbit/s (10 faisceaux de 1,6 Gbit/s), sans aucune régénération, a déjà été réalisée.

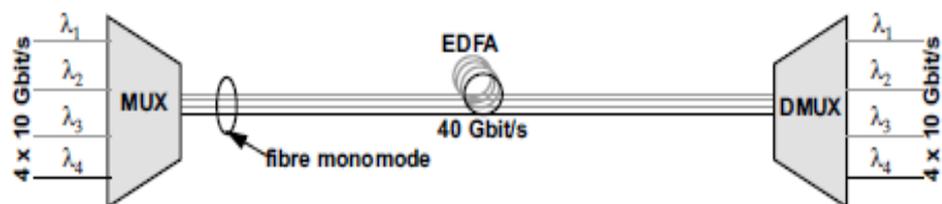


Figure 3.36. Principe d'une liaison WDM

La figure 3.37 illustre un réseau de communication utilisant le multiplexage en longueur d'onde. Le chemin d'un nœud à un autre peut-être entièrement optique ou passer par des commutateurs optoélectroniques.

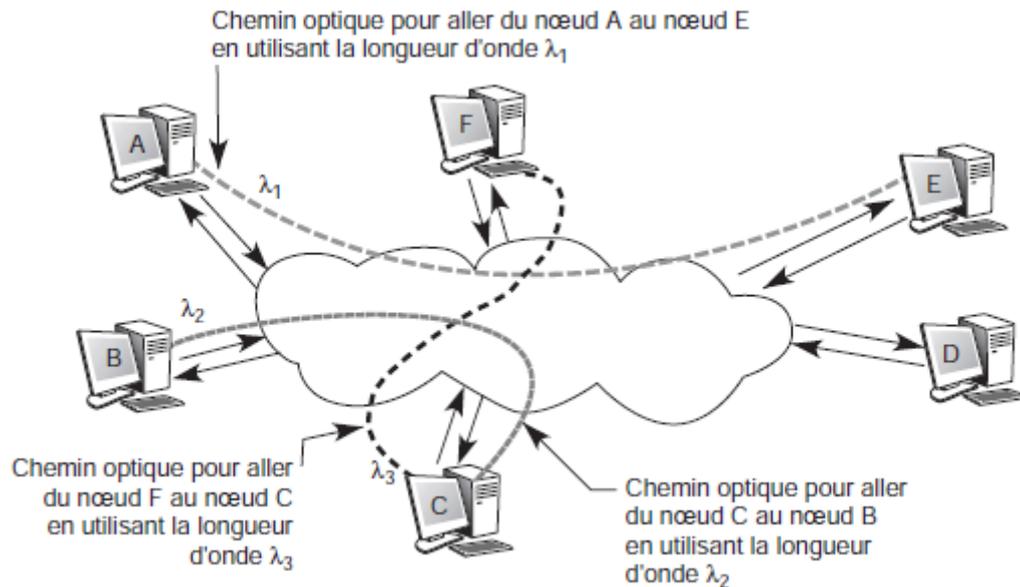


Figure 3.37 Multiplexage en longueur d'onde dans un réseau optique.

Sur chaque longueur d'onde, un autre niveau d'optoélectronique peut être utilisé, soit par un multiplexage en fréquence, et dans ce cas la bande passante est de nouveau subdivisée entre plusieurs stations (Subcarrier Multiplexing), soit par un multiplexage temporel (Time Division Multiplexing). Les réseaux optiques à multiplexage en longueur d'onde peuvent être regroupés en deux sous-catégories :

- les réseaux à diffusion ;
- les réseaux à routage en longueur d'onde. Chacune de ces sous-catégories peut être à saut unique (single-hop) ou à saut multiple (multi-hop).

3.3 L'ACCÈS AUX RÉSEAUX, LA BOUCLE LOCALE

La boucle locale correspond à l'ensemble des moyens mis en oeuvre par un opérateur pour collecter le trafic des utilisateurs. Une définition plus restrictive limite l'utilisation du terme boucle locale au seul câble de raccordement usager/réseau. Pour des raisons historiques, l'infrastructure du réseau de boucle locale correspond à celle de la distribution des services voix. Cette infrastructure est aujourd'hui partagée entre les accès aux réseaux voix et les accès aux réseaux de données.

3.3.1. Organisation de la distribution des accès

Les moyens d'accès se répartissent en deux catégories, les accès aux réseaux d'opérateurs (opérateurs de boucle locale) et les moyens fournis à l'utilisateur pour raccorder ses propres sites informatiques et réaliser ainsi un réseau privé (opérateur de liaisons louées). La figure 3.38 illustre cette approche.

La réalisation d'un réseau de distribution (collecte) nécessite des investissements importants. Dans la plupart des pays, ces réseaux ont été financés par des ressources publiques.

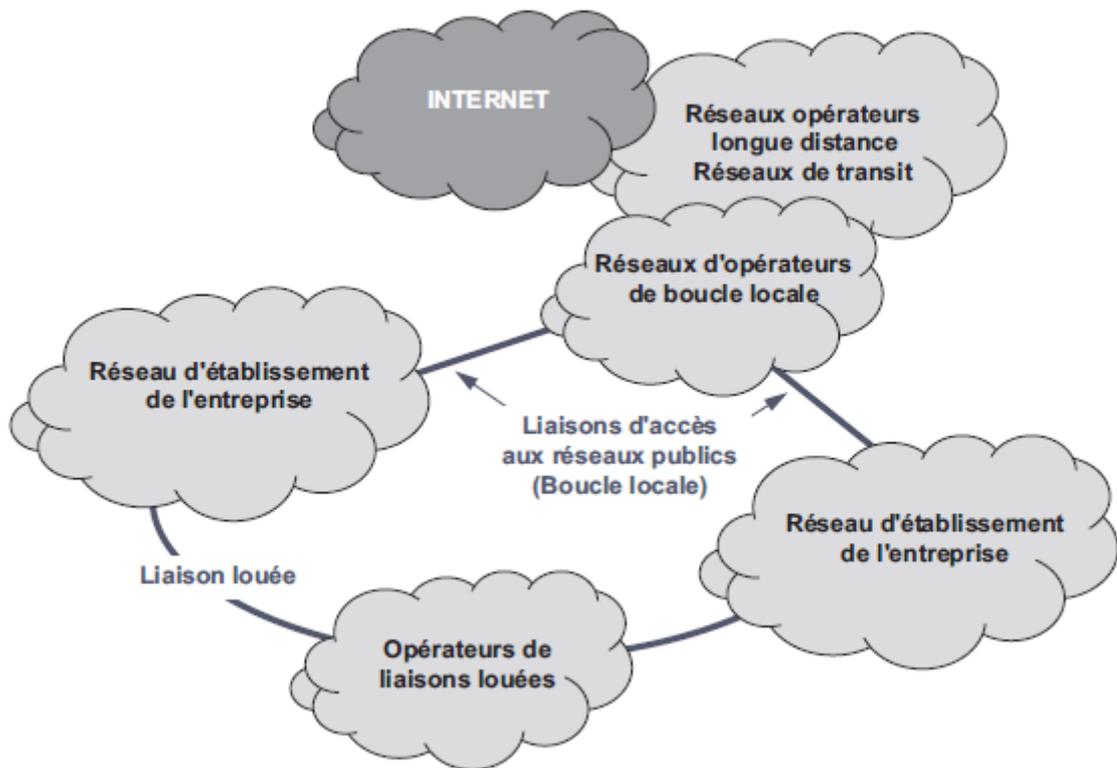


Figure 3.38 Principe du raccordement des usagers.

La mise en concurrence des télécommunications a donc posé le problème du partage de cette ressource. C'est sous le terme de dégroupage de la boucle locale que l'ART (Autorité de Régulation des Télécommunications) a organisé ce partage, en instituant la colocalisation des équipements actifs (figure 3.39).

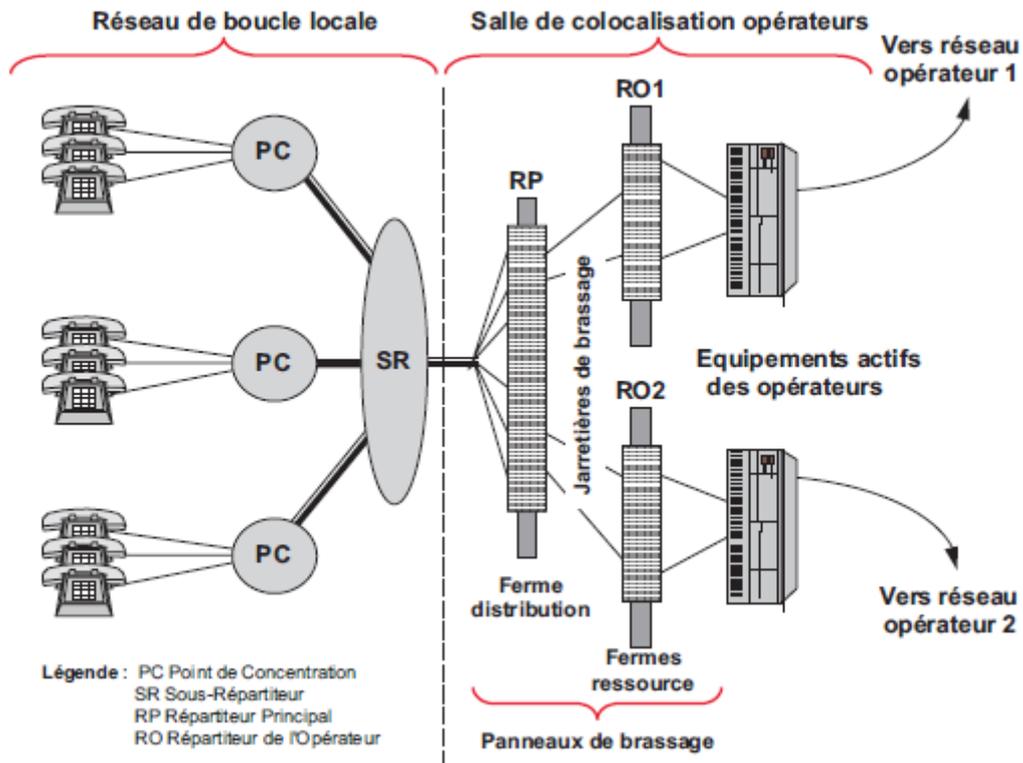


Figure 3.39. Dégrouper physique selon l'ART.

3.3.2. L'accès aux réseaux par liaison dédiée (ligne spécialisée)

Les liaisons louées peuvent être utilisées pour réaliser des réseaux privés, mais elles constituent aussi le principal moyen d'accès permanent au réseau d'un opérateur réseau de transport qui les loue à un opérateur de liaisons louées. L'opérateur de service réseau fournit alors les moyens d'extrémités, modems voire l'équipement d'accès appelé **CPE** (*Customer Premises Equipment*) pouvant être un routeur, un FRAD (*Frame Relay Access Device*), un commutateur...). La figure 3.40 illustre le principe d'un tel accès.

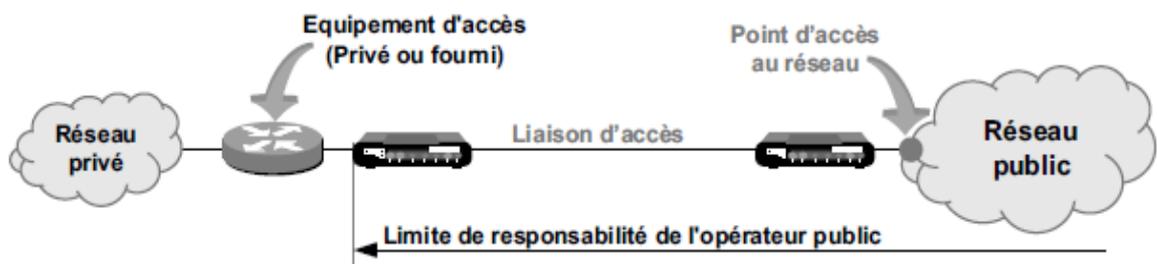


Figure 3.40. Principe de l'accès permanent à un réseau.

3.3.3. La Boucle locale radio (BLR)

La BLR, ou boucle locale radio, permet de connecter des utilisateurs sur une antenne distante d'un opérateur de télécommunications. Cette technique fait partie des WLL (Wireless Local Loop), dits encore WITL (Wireless In The Loop), ou RITL (Radio In The Loop), autant d'acronymes qui désignent des techniques de boucle locale sans fil.

L'abréviation BLR est la terminologie adoptée en France. Elle recouvre un certain nombre de techniques adaptées au cas français. Une autre façon de présenter cette solution est de parler de *xDSL* hertzien. Nous essaierons dans la suite de ce chapitre de nous positionner de façon plus générale en incluant les technologies et les fréquences utilisées à l'étranger. La boucle locale radio est une technologie sans fil bidirectionnelle, dans laquelle l'équipement terminal ne peut être mobile pour le moment au sens d'un réseau de mobiles. L'antenne de réception doit être grande et fixe. Une boucle locale est illustrée à la figure 3.41. Elle est formée d'un ensemble de cellules (en grisé sur la figure). Chaque cellule est raccordée à une station de base, qui dessert les utilisateurs abonnés. La station de base est constituée de une ou plusieurs antennes reliées aux utilisateurs directement par un faisceau hertzien. Les stations de base sont interconnectées par un réseau terrestre. L'accès à ce réseau terrestre s'effectue par le biais d'un commutateur.

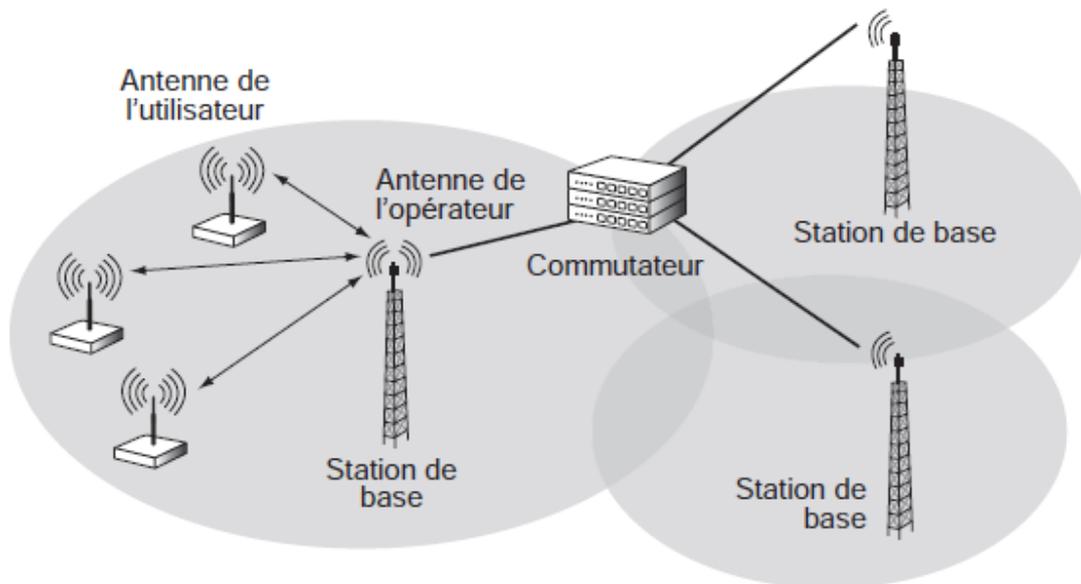


Figure 3.41. Boucle locale radio

L'avantage de cette solution de réseau d'accès réside dans la simplicité de sa mise en place. Il suffit de relier l'antenne de l'utilisateur à l'antenne de la station de base, évitant de la sorte tous les travaux de génie civil que demande la pose de câbles. Cependant, il ne faut pas négliger la mise en place de

l'infrastructure à l'intérieur du ou des bâtiments de l'utilisateur pour connecter toutes les machines à l'antenne, laquelle doit être généralement en vue directe de l'antenne de l'opérateur.

Dans la suite, nous appelons WLL toutes les boucles locales sans fil, incluant à la fois les technologies adoptées en France sous le nom de BLR et celles utilisées hors de France.

4.1. Les technologies DSL

L'accès au réseau haut débit de l'opérateur *via* la ligne téléphonique nécessite l'installation d'un équipement spécifique chez l'utilisateur final qui assure la séparation des canaux : le *splitter* (séparateur vocal), ou coupleur **POTS** (*Plain Old Telephon Service*, service téléphonique traditionnel) et le modem ADSL. Le *splitter* est généralement intégré au modem. Le modem offre un accès de type Ethernet, USB ou Wi-Fi. Du côté opérateur, le **DSLAM** (*Digital Subscriber Line Access Multiplex*) est un multiplexeur fréquentiel assurant la séparation des bandes de fréquences téléphoniques et de données, modem ADSL, il assure aussi l'interface entre les connexions utilisateurs et le réseau haut débit de l'opérateur (figure 13.47). Cependant, la connexion IP doit être prolongée jusque chez le fournisseur de service Internet (**FAI**), ce rôle est dévolu au **BAS** (*Broadband Access Server*), la figure 4.1 illustre l'architecture protocolaire d'un accès ADSL.

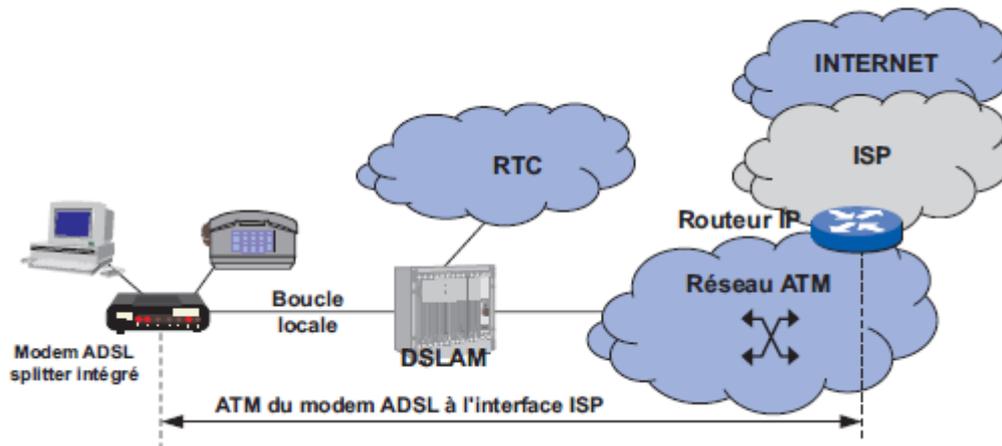


Figure 4.1 Architecture d'un réseau ADSL.

4.1.1. Le modem ADSL

Deux techniques sont utilisées pour augmenter le débit sur une communication xDSL : le full-duplex, qui est assuré sur une même paire grâce à l'annulation d'écho, et l'utilisation d'un code spécifique, 2B1Q. Les modems ADSL offrent une bande montante de 4 à 100 kHz, qui est utilisée pour des débits de 0,64 Mbit/s. La bande descendante utilise une bande comprise entre 100 kHz et 1,1 MHz, qui permet d'atteindre le débit de 8,2 Mbit/s. La parole analogique, entre 0 et 4 kHz, passe en parallèle des données utilisant le modem. Les codes en ligne des modems ADSL reposent soit sur la modulation CAP (Carrierless Amplitude and Phase), soit sur la norme DMT (Discrete MultiTone), de l'ANSI (American National Standards Institute) et de l'ETSI. La méthode DMT consiste en l'utilisation de 256 canaux de 4 kHz, chaque canal permettant l'émission de 15 bits par hertz au maximum. La figure 4.2 illustre la partie du spectre utilisée par les modems ADSL.

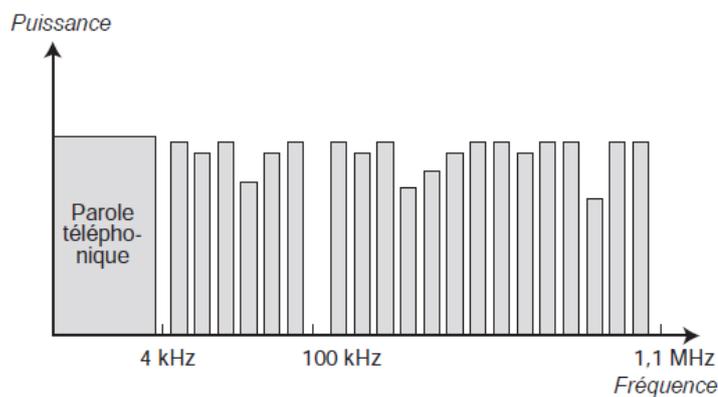


Figure 4.2. *Partie du spectre utilisée par l'ADSL*

Le spectre est donc découpé en trois parties, une entre 0 et 4 kHz, pour faire passer la parole téléphonique qui continue à être acheminée en parallèle des données, une entre 4 et 100 kHz, pour la voie montante allant du terminal vers le réseau, et une entre 100 kHz et 1,1 MHz pour la voie descendante allant du réseau au terminal. La partie montante du spectre est divisée en bandes de 4,3 kHz, et plus exactement en 20 sous-bandes de 4,3 kHz. Chaque sous-bande est capable de transporter de 4 à 15 bits en parallèle. En choisissant 8 bits par intervalle d'horloge, avec quatre mille intervalles de temps par seconde, le modem ADSL permet de transporter :

$4\ 000 * 8 \text{ bits} = 32 \text{ Kbit/s}$ par sous-bande Comme il y a 20 sous-bandes, on arrive au total de $32 * 20 = 640 \text{ Kbit/s}$. La partie montante de la communication est découpée en 256 tranches de 4,3 kHz. Toujours pour un transport de 8 bits par intervalle de temps, on arrive au débit de : $4\ 000 * 8 \text{ bits} * 256 = 8,2 \text{ Mbit/s}$

Il est possible d'améliorer le débit en augmentant le nombre de bits par intervalle de temps. Des versions simplifiées de modems ADSL sont parfois mises en oeuvre dans certains pays, telles que l'ADSL Lite, ou G-Lite, et l'U-ADSL (Universal ADSL). L'objectif de cette simplification est d'offrir un accès à Internet à très bas prix. Les capacités de transmission sont respectivement de 1,5 Mbit/s et 512 Kbit/s. Des cartes ADSL Lite sont commercialisées pour les PC.

4.1.2. Les DSLAM (DSL Access Module)

Les DSLAM forment l'autre extrémité de la liaison, chez l'opérateur. Ce sont des équipements dont le rôle est de récupérer les données émises par l'utilisateur depuis son équipement terminal au travers de son modem ADSL. Ces équipements intègrent des modems situés à la frontière de la boucle locale et du réseau de l'opérateur. La figure 4.3 illustre le positionnement d'un DSLAM.

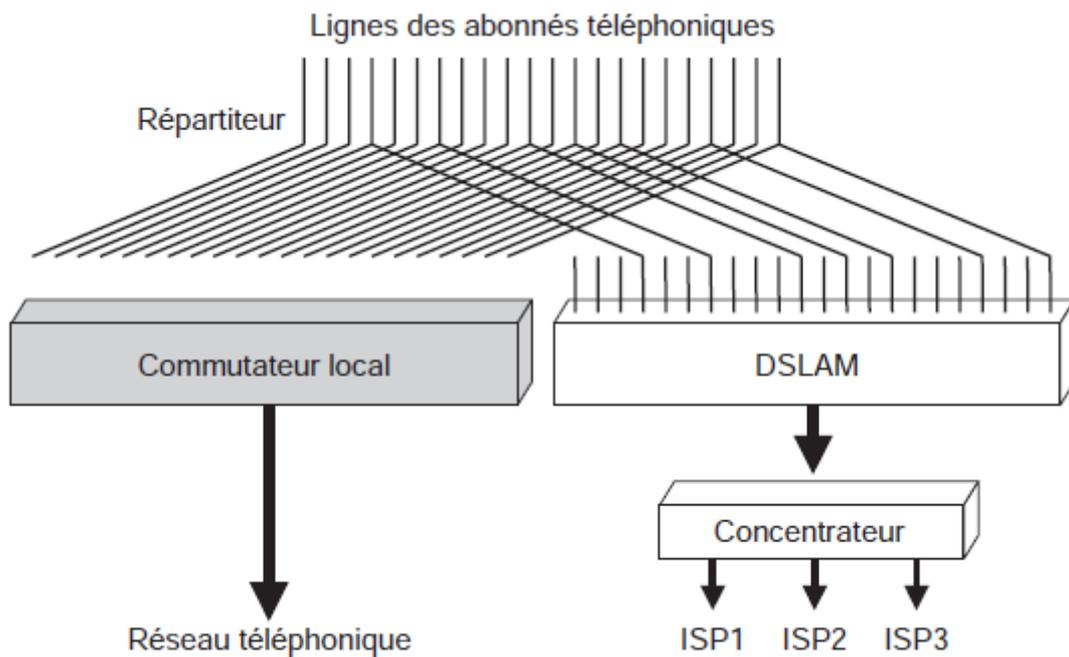


Figure 4.3. Positionnement d'un DSLAM

Les lignes des abonnés à l'opérateur local arrivent sur un répartiteur, qui permet de connecter l'utilisateur au commutateur téléphonique et au DSLAM s'il a un abonnement DSL. Le DSLAM est lui-même connecté à un concentrateur.

4.1.3. Les protocoles de l'ADSL

L'utilisateur générant des paquets IP, il faut pouvoir transporter ces paquets IP vers le modem ADSL. Pour cela, on utilise soit une trame Ethernet, soit une trame PPP, soit une trame USB, soit une superposition de ces trames, comme une trame PPP encapsulée dans une trame Ethernet ou une trame PPP encapsulée dans une trame USB.

Prenons l'exemple de paquets IP encapsulés dans une trame Ethernet. Cette trame est envoyée soit sur un réseau Ethernet reliant le PC du client au modem, soit dans une trame PPP sur une interface de type USB. Dans le modem ADSL, il faut décapsuler la trame pour récupérer le paquet IP puis l'encapsuler de nouveau, mais cette fois dans une trame ATM. Cette fragmentation en morceaux de 48 octets est réalisée par le biais d'une couche AAL-5 (ATM Adaptation Layer de type 5).

Une fois la trame ATM arrivée dans le DSLAM, plusieurs cas de figure peuvent se présenter suivant l'architecture du réseau de l'ISP auquel le client est connecté. Une première solution consiste à décapsuler les cellules ATM et à récupérer le paquet IP qui est transmis vers le concentrateur dans une trame Ethernet. Le concentrateur l'envoie vers l'ISP également dans une trame Ethernet. Une deuxième solution consiste à laisser les trames sous forme ATM. C'est le cas lorsque l'opérateur de la boucle locale et l'ISP utilisent la même technologie. Dans ce cas, la cellule ATM est directement envoyée vers le concentrateur, qui joue le rôle de commutateur ATM. Celui-ci envoie les trames ATM par des circuits virtuels vers des BAS (Broadband Access Server), qui sont les équipements intermédiaires permettant d'accéder aux réseaux des ISP alternatifs. Ces topologies sont illustrées à la figure 4.4.

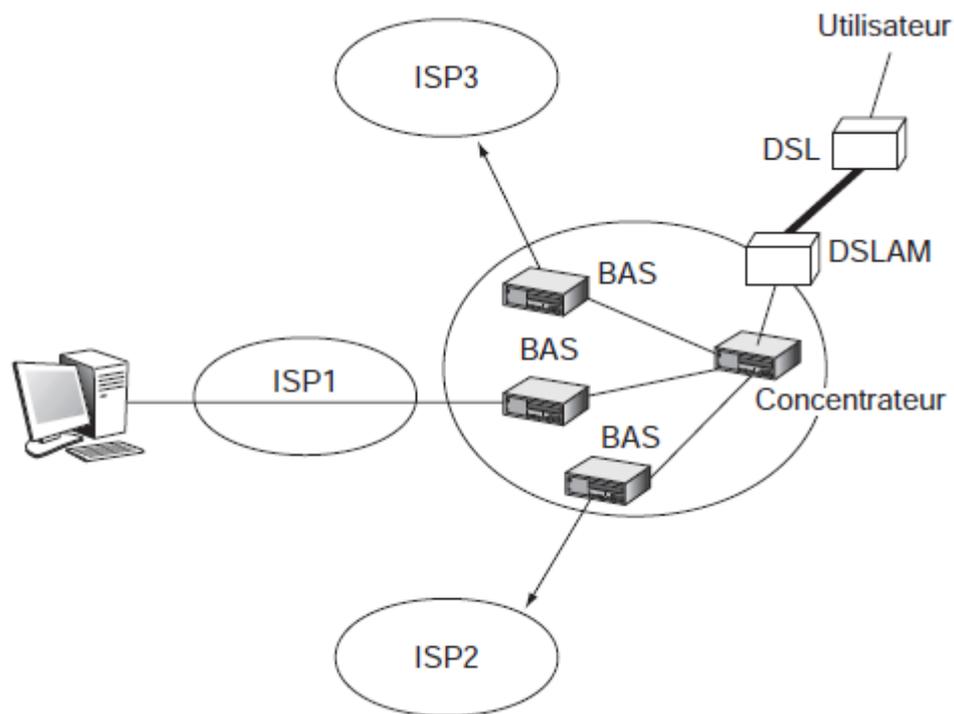


Figure 4.4. Équipements de concentration entre l'utilisateur et le serveur

Une autre solution, qui est aussi très utilisée, consiste à placer le paquet IP de départ dans une trame PPP et à garder cette trame tout le long du chemin, quitte à l'encapsuler dans d'autres trames. Cela a donné naissance au protocole PPPoE (PPP over Ethernet) dans le cas où la trame PPP est émise sur Ethernet.

ADSL est normalisé par l'ANSI et l'ETSI. Cependant, compte tenu des investissements nécessaires au déploiement d'un réseau ADSL, les constructeurs et opérateurs ont constitué un groupe de travail, le UAWG (*Universal ADSL Working Group*), pour définir une version allégée. L'ADSL G.Lite intègre le *splitter* (séparateur de voies) au modem autoconfigurable (*Plug and Play*), limite les débits à 1,5 Mbit/s en flux montant et à 512 kbit/s en flux descendant en réduisant les sous-canaux.

Appellation	Débit descendant	Débit montant	Distance	Utilisation
ADSL	32 kbit/s à 8 Mbit/s	32 kbit/s à 1,1 Mbit/s	5,5 km	Accès professionnel à Internet Interconnexion de LAN Vidéo à la demande (VoD)
UADSL G.Lite	64 kbit/s à 1,5 Mbit/s	32 kbit/s à 512 kbit/s	5,5 km	Accès résidentiel à Internet
SDSL	1,54 Mbit/s (T1) 2,048 Mbit/s (E1)	1,54 Mbit/s (T1) 2,048 Mbit/s (E1)	6,5 km	Interconnexion de LAN Serveur Internet Vidéoconférence
IDSL	144 kbit/s à 1,5 Mbit/s	32 kbit/s à 512 kbit/s	11 km	Accès RNIS
VDSL	13 à 52 Mbit/s	1,5 à 2,3 Mbit/s	1,2 km	Accès Internet, VoD TV haute définition
HDSL	1,5 Mbit/s (T1) 2,048 Mbit/s (E1)	1,5 Mbit/s (T1) 2,048 Mbit/s (E1)	4,5 km	Accès professionnel E1 Raccordement PABX Interconnexion de LAN

Figure 4.5. Les différentes technologies xDSL.

Compte tenu de l'intérêt économique des techniques DSL, d'autres solutions ont été développées pour raccorder à moindres frais les usagers aux réseaux des opérateurs. Le tableau de la figure 11.97 présente succinctement ces différentes versions.

VDSL: ainsi, en utilisant une bande de fréquence encore plus large et plus haute, le VDSL (*Very high bit-rate DSL*) permettra d'atteindre un débit de 52 Mbit/s en réception et de 12 Mbit/s en émission. Les modems VDSL peuvent se mettre à la sortie d'un PON (Passive Optical Network) pour prolonger leur liaison vers l'utilisateur. Les PON étant en technologie ATM, les modems VDSL doivent en ce cas accepter la trame ATM.

4.2. La fibre optique

Une première solution pour mettre en place une boucle locale puissante consiste à recâbler complètement le réseau de distribution en fibre optique. Cette technique, dite FITL (Fiber In-The-Loop), est particulièrement adaptée au RNIS large bande. Elle permet d'obtenir de hauts débits jusqu'à l'extrémité, qui peut être le terminal utilisateur lui-même. La boucle locale optique se présente sous la forme illustrée à la figure 9.1. Sa topologie est un arbre optique passif, ou PON (Passive Optical Network).

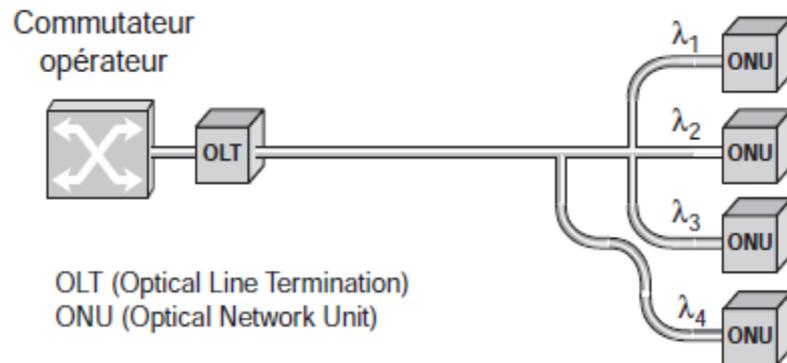


Figure 4.6. Boucle locale optique

La mise en oeuvre d'un tel câblage est assez onéreuse. Il est possible d'en réduire le coût en ne câblant pas la portion allant jusqu'à la prise terminale de l'utilisateur. Il faut pour cela déterminer le point jusqu'où le câblage doit être posé. Plusieurs solutions s'offrent pour cela à l'opérateur :

- **FTTC (Fiber To The Curb)**. On câble jusqu'à un point assez proche de l'immeuble ou de la maison qui doit être desservi, le reste du câblage étant effectué par l'utilisateur final.
- **FTTN (Fiber To The Node)**. On câble jusqu'à un répartiteur dans l'immeuble lui-même.
- **FTTH (Fiber To The Home)**. On câble jusqu'à la porte de l'utilisateur.
- **FTTT (Fiber To The Terminal)**. On câble jusqu'à la prise de l'utilisateur, à côté de son terminal.

4.2.1. PON

Sur le réseau optique passif (PON), il est possible de faire transiter des cellules ATM suivant la technique FSAN (*Full Service Access Network*), normalisée dans la recommandation G.983 de l'UIT-T. Les deux extrémités de l'arbre optique s'appellent OLT (Optical Line Termination) et ONU (Optical Network Unit). Pour des raisons de déperdition d'énergie, il n'est pas possible de dépasser une cinquantaine de branches sur le tronc. La figure 4.7 illustre l'architecture d'un réseau optique passif.

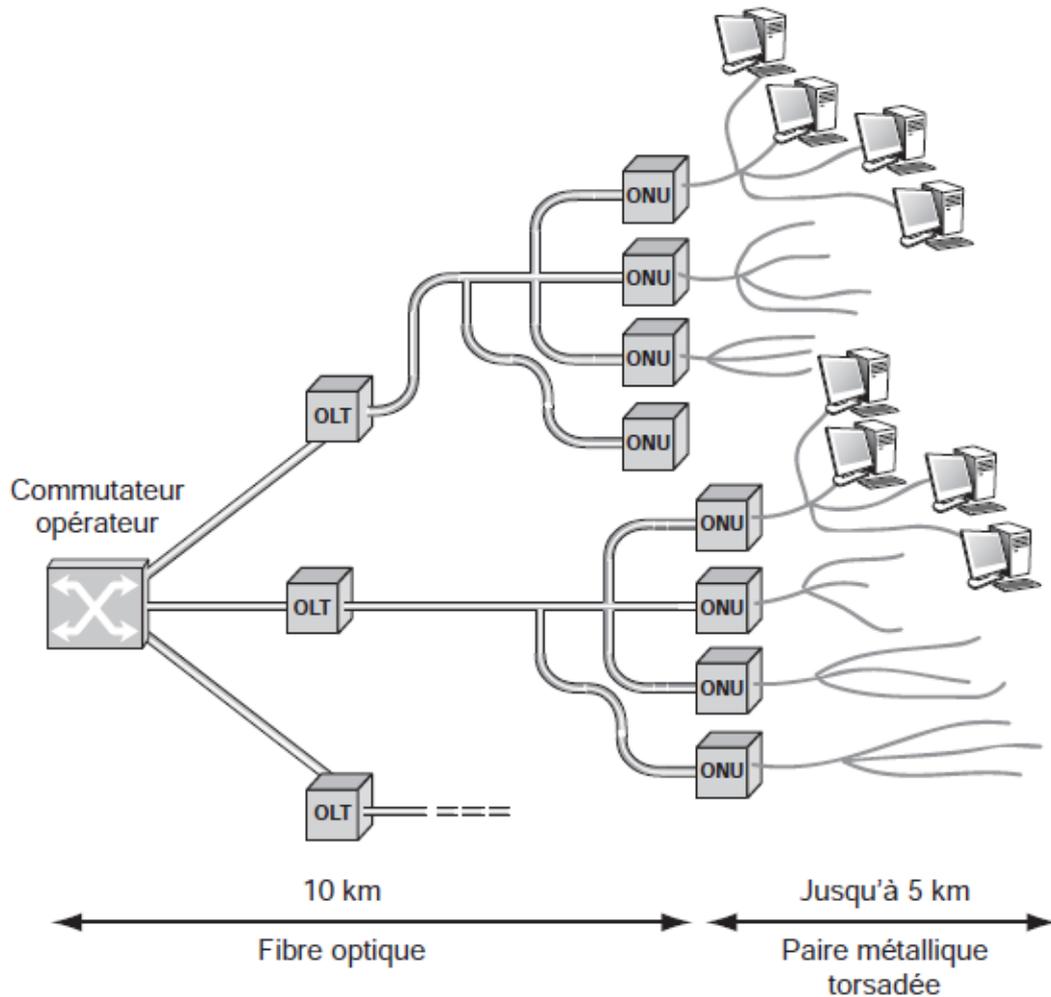


Figure 4.7. Architecture d'un PON

Un « superPON » a également été défini, connectant jusqu'à 2 048 ONU sur un même OLT. Dans ce cas, le débit montant est de 2,5 Gbit/s. Sur les réseaux d'accès en fibre optique mis en place par les opérateurs, c'est le protocole ATM qui est généralement retenu. Le système prend alors le nom de APON (ATM Over PON).

4.3. Les réseaux locaux sans fil

Les réseaux locaux sans fil sont en plein développement du fait de la flexibilité de leur interface, qui permet à un utilisateur de changer de place dans l'entreprise tout en restant connecté. Ces réseaux atteignent des débits de plusieurs mégabits par seconde, voire de plusieurs dizaines de mégabits par seconde. Bien que plusieurs de ces réseaux, tels Wi-Fi ou WiMax, ne soient pas directement des réseaux de la boucle locale, ils commencent à être utilisés pour recouvrir une ville ou une agglomération. La

figure 4.8 donne une représentation des principaux réseaux disponibles ou en cours de normalisation à l'IEEE ou à l'ETSI.

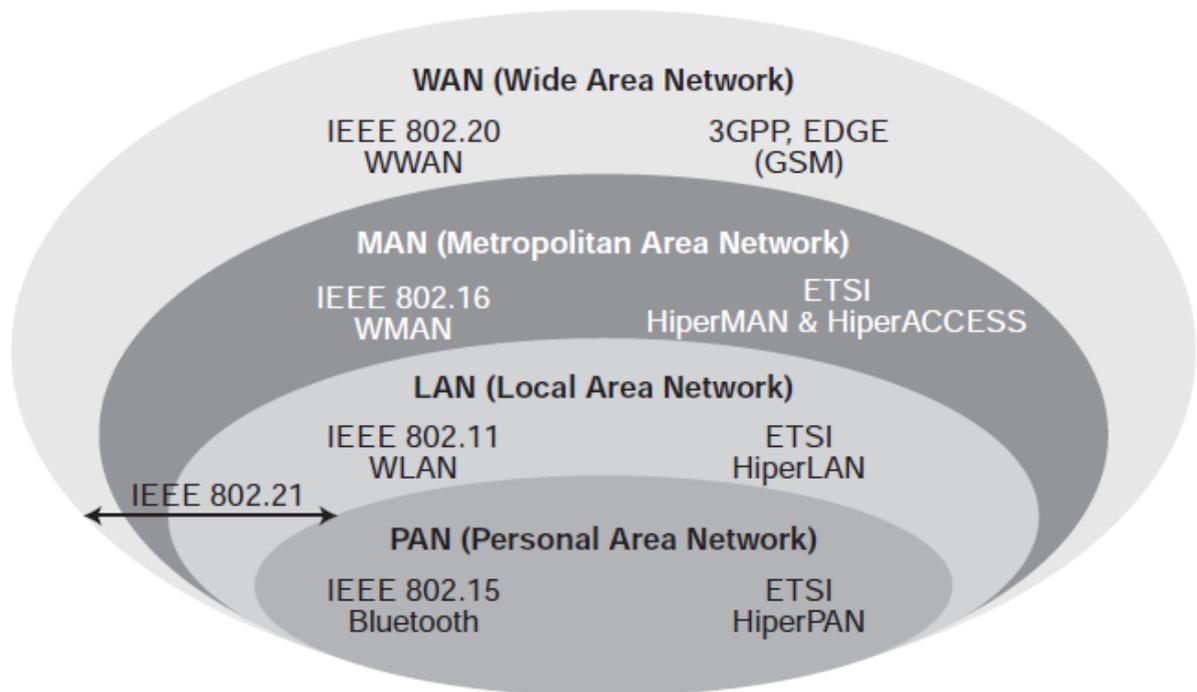


Figure 4.8 Les différents réseaux sans fil

4.3.1 L'architecture SANS FIL 802.11 (WiFi)

Cette technologie permet de relier dans un réseau local sans fil ou **WLAN** (*Wireless LAN*) des équipements de type PC portable, tablette ou smartphone en utilisant les ondes radio. Les performances atteintes (11 à 300 Mbit/s pour des portées de l'ordre d'une centaine de mètres) permettent d'envisager le remplacement partiel de réseaux filaires de type Ethernet et d'éviter ainsi les contraintes du câblage. Des ponts sont prévus pour se relier aux réseaux locaux filaires ou à l'Internet. Le standard d'interopérabilité WiFi (*Wireless Fidelity*) facilite la commercialisation de produits à la norme IEEE 802.11.

La norme IEEE 802.11 concerne la couche MAC du modèle IEEE associée à différentes normes de transmission radio (FHSS/DSSS/OFDM).

Couches OSI	Couches IEEE	Normes
Liaison	LLC (<i>Logical Link Control</i>)	802.2
	MAC (<i>Medium Access Control</i>)	802.11
Physique	PHY (<i>Physical Signalling Layer</i>)	FHSS DSSS OFDM

Figure 4.9. *Modèle IEEE 802.11.*

Deux catégories d'équipements sont définies par cette norme :

- les stations sans fil (*wireless station*) : PC portable ou smartphone équipés d'une WNIC (*Wireless Network Interface Card*) ;
- les points d'accès (AP, *Access Point*) qui coordonnent les transmissions et servent de pont entre le réseau câblé et le WLAN.

L'organisation du réseau sans fil est basée sur une topologie cellulaire (le système est subdivisé en cellules) où chaque cellule (BSS, *Basic Service Set*) est contrôlée par un AP. La norme 802.11 implémente deux modes de fonctionnement.

• **Le mode infrastructure** (*Infrastructure Mode*) illustré figure 4.10. Dans la plupart des installations, le WLAN est composé de plusieurs cellules où chaque AP de cellule est interconnecté aux autres par une dorsale (*backbone*) câblée (DS, *Distribution System*). Cette interconnexion correspond à un ensemble étendu de cellules (ESS, *Extended Service Set*).

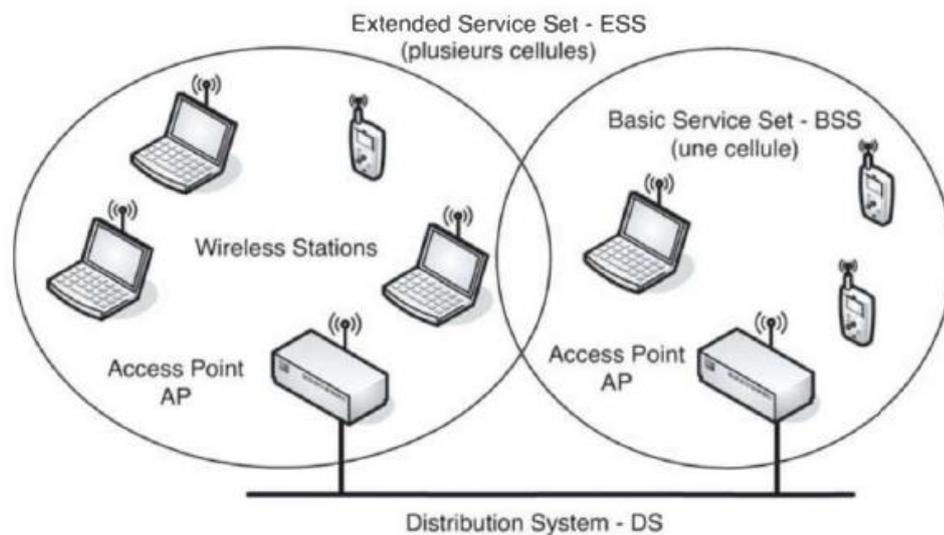


Figure 4.10. *Mode infrastructure.*

Le mode *ad hoc* (figure 4.11), également appelé mode sans infrastructure ou IB SS (*Independent Basic Service Set*), permet à des stations de communiquer directement entre elles sans utiliser un point d'accès. Ce mode simplifié permet de réaliser rapidement une communication entre deux stations sans fil. Pour pouvoir fonctionner sur un réseau étendu, ce mode doit être associé à un protocole de routage *ad hoc* permettant à une station de communiquer avec une station éloignée par l'intermédiaire de stations faisant office de routeur.

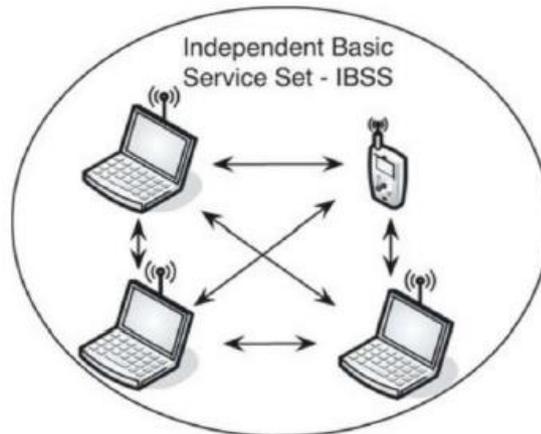


Figure 4.11 Mode *ad hoc*.

4.3.2. WiMAX (IEEE802.16)

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) est un standard de transmission sans fil permettant, comme l'ADSL, de transporter des signaux numériques sur des distances de plusieurs kilomètres. L'objectif principal est de couvrir la zone dite du « dernier kilomètre », encore appelée boucle locale radio, particulièrement dans des endroits où l'abonné est situé trop loin de son équipement de raccordement, rendant l'ADSL inexploitable. Le WiMAX qui est souvent comparé à un « ADSL sans fil » permet donc de fournir un accès haut débit à l'Internet dans les zones non couvertes par les technologies filaires classiques ou encore permet de raccorder à l'Internet une zone équipée localement en ADSL (figure 4.12).

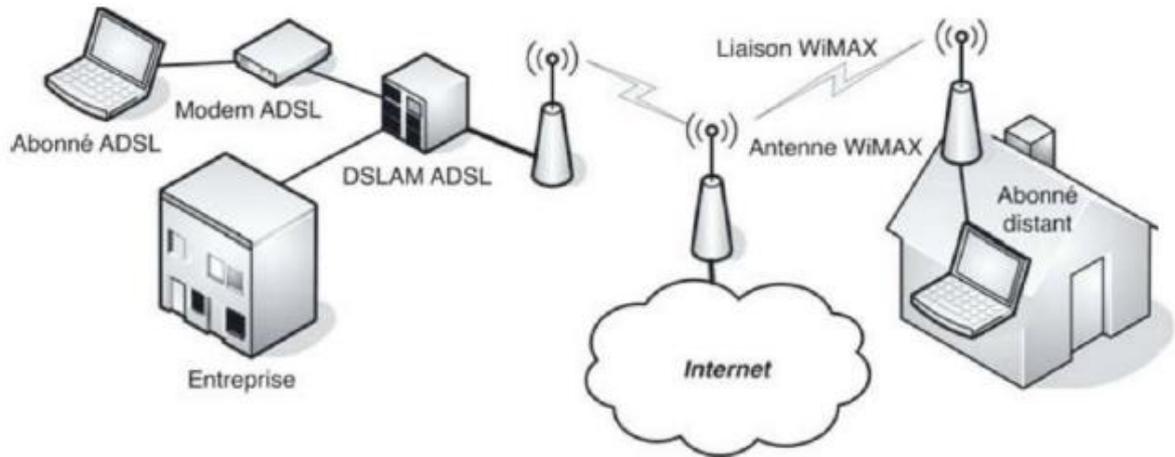


Figure 4.12. Utilisation du WiMAX pour la connexion Internet.

Une autre exploitation possible est l'utilisation du WiMAX comme réseau d'interconnexion entre des réseaux locaux sans fil, utilisant par exemple le standard WiFi. Comme l'illustre la figure 4.13, le WiMAX permet, dans ce cas, de relier entre elles différentes cellules (différents « hotspots ») afin de créer un réseau maillé (*mesh network*).

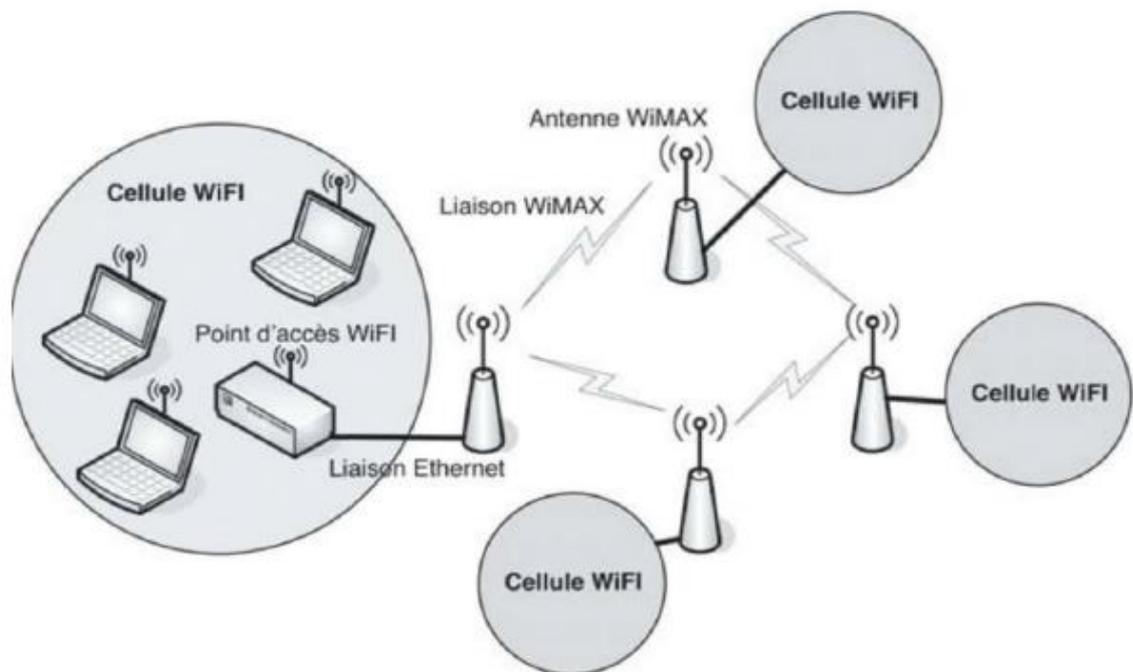


Figure 4.13. Utilisation du WiMAX pour relier des réseaux WiFi.

Concernant la transmission radio, WiMAX est une norme basée sur le standard IEEE 802.16. Ce standard permet théoriquement d'émettre et de recevoir des données dans les bandes de fréquences radio de 2 à 66 GHz avec un débit maximum théorique de 70 Mbps sur une portée de 50 km. En pratique, WiMAX permet d'atteindre 12 Mbps sur une portée de 20 km.

4.4. Réseaux mobiles

Les réseaux cellulaires sont des réseaux d'opérateur organisés en cellules pour offrir à l'abonné une connectivité sans fil vers un réseau téléphonique ou vers l'Internet à partir de son téléphone mobile ou de son smartphone. Une cellule est une zone géographique dont tous les points peuvent être atteints à partir d'une même antenne. Chaque cellule dispose d'une station de base qui assure la couverture radio. Une station de base comporte plusieurs porteuses, qui desservent les canaux de trafic des utilisateurs, un canal de diffusion, un canal de contrôle commun et des canaux de signalisation. Lorsqu'un utilisateur d'un réseau cellulaire se déplace et change de cellule, le cheminement de l'information doit être modifié pour tenir compte de ce déplacement, Cette modification s'appelle handover .

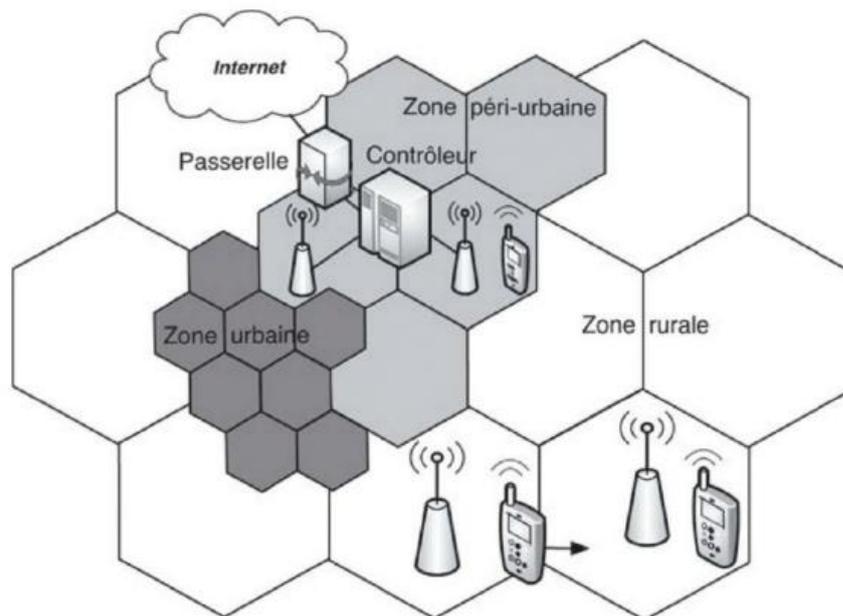


Figure 4.14. Architecture d'un réseau cellulaire.

4.4.1. Les trois générations de réseaux de mobiles

Trois générations de réseaux de mobiles se sont succédé, qui se distinguent par la nature de la communication transportée :

- communication analogique ;
- communication numérique sous forme circuit, avec deux options : mobilité importante et mobilité réduite ;
- applications multimédias sous forme paquet.

4.4.1.1. Le réseau GSM

a) Architecture

L'architecture d'un réseau GSM de base peut être divisée en deux sous-systèmes (figure 4.15) :

- le sous-système radio ou BSS (*Base Station Subsystem*) qui gère la transmission radio. Il est constitué du mobile de l'abonné ou MS (*Mobile System*), de la station de base ou BTS (*Base Transceiver Station*) qui inclut l'antenne-relais et du contrôleur de station de base ou BSC (*Base Station Controller*) ;
- le sous-système réseau ou NSS (*Network Subsystem*) qui prend en charge toutes les fonctions de contrôle et d'analyse des informations contenues dans des bases de données nécessaires à l'établissement des connexions (authentification de l'abonné, itinérance, chiffrement...). Le NSS comprend le MSC (*Mobile Switching Center*) et les bases de données en liaison (VLR, HLR...).

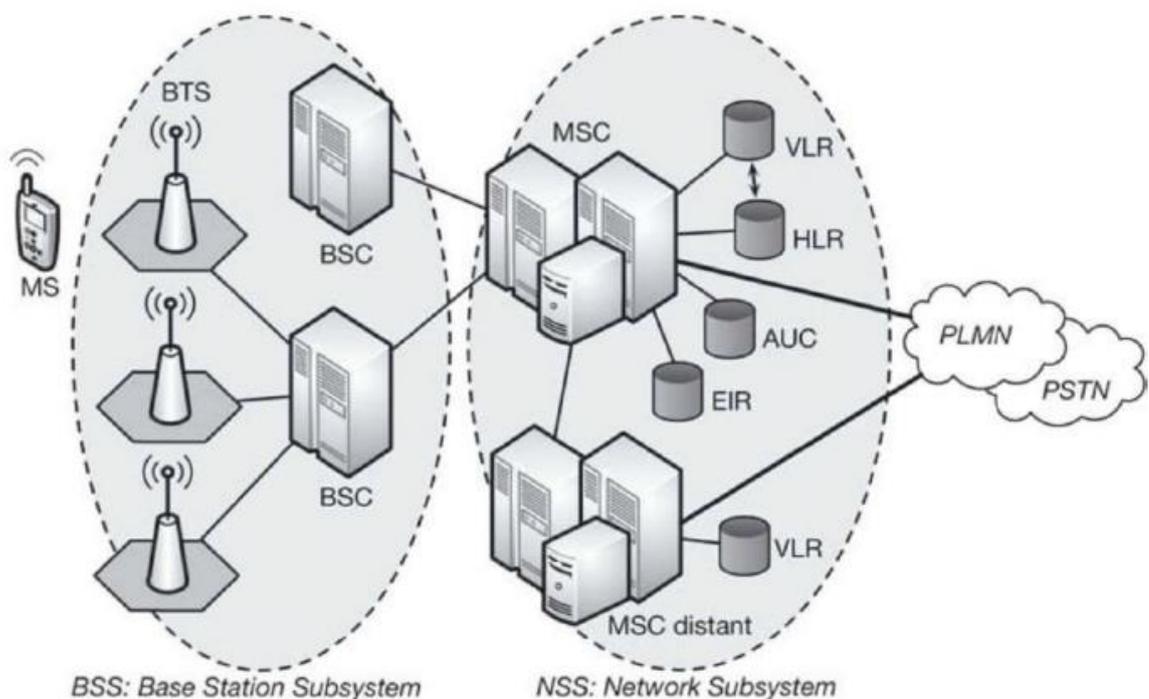


Figure 4.15. Architecture du réseau GSM

- La MS qui intègre le système d'émission/réception radio de l'abonné comporte également une carte à puce qui permet de rendre indépendant l'abonnement du terminal physique. Cette carte SIM (*Subscriber Identity Module*) possède une mémoire:
 - les caractéristiques de l'abonnement ;
 - le MSISDN (*Mobile Station International ISDN Number*) : numéro international de l'abonné suivant le plan de numérotation E. 164. C'est par ce numéro qu'il peut appeler ou être appelé ;
- le IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) qui est l'identité permanente du mobile auprès du réseau. Elle n'est pas connue par l'utilisateur ;
- le TMSI (*Temporary Mobile Subscriber Identity*) qui est l'identité temporaire du mobile auprès du MSC ;
- les algorithmes de chiffrement.

Le mobile comporte également :

- le MSRN (*Mobile Station Roaming Number*), numéro temporaire au même format que le MSISDN qui remplace ce dernier en cas d'itinérance (*roaming*) ;
- l'IMEI (*International Mobile Equipment Identity*), identité propre au terminal allouée lors de sa fabrication.

Le BTS (*Base Transceiver Station*) est la station de base d'émission et de réception. Elle assure la couverture radio d'une cellule (rayon de 200 m à ~30 km) et prend en charge les opérations de modulation/démodulation, de correction des erreurs, de cryptage des communications et de mesure de la qualité et de la puissance de réception.

Le BSC (*Base Station Controller*) pilote un ensemble de stations de base (typiquement ~60) et réalise l'aiguillage vers le BTS destinataire. Il gère donc les ressources radio (affectation des fréquences, contrôle de puissance...), les appels (établissement, supervision, libération des communications...) et les transferts inter- cellulaires (*handover*).

Le MSC (*Mobile Switching Center*) est un commutateur numérique en mode circuit qui oriente les signaux vers les BSC. Il établit la communication en s'appuyant sur les bases de données qui lui sont reliées et assure l'interconnexion avec les autres réseaux cellulaires (PLMN, *Public Land Mobile Network*) et les réseaux téléphoniques fixes (PSTN, *Public Switched Telephone Network*). Les bases de données reliées au MSC ont différents rôles :

- **le HLR** (*Home Location Register*) est unique au réseau et contient les informations relatives aux abonnés : données statiques (IMSI, MSISDN, type d'abonnement...) et données dynamiques (localisation, état du terminal...);
- **le VLR** (*Visitor Location Register*) est une base de données locale (un VLR par commutateur MSC) qui contient les informations relatives aux abonnés présents

dans la zone associée (il est donc mis à jour à chaque changement de cellule d'un abonné). Le VLR échange en permanence des informations avec le HLR et contient en plus de ce dernier l'identité temporaire (TMSI) et la localisation de l'abonné ;

- l'AUC (*Authentication Center*) assure l'authentification des abonnés et gère les fonctions de chiffrement grâce aux clés de cryptage contenues dans la carte SIM ;
- l'EIR (*Equipment Identity Register*) empêche l'accès au réseau aux terminaux non autorisés (terminaux volés) grâce au IMEI. A chaque appel, le MSC contacte le EIR et vérifie la validité du IMEI.

4.4.1.2. La 3G et l'UMTS

a) Objectifs

La technologie GSM proposée à la base dans la deuxième génération possède un débit de transmission limité à 9 kbit/s, suffisant pour la téléphonie mobile pour laquelle elle était prévue au départ, mais insuffisant pour transporter des données. Les évolutions successives de la 2G ont fait évoluer ce débit et ont rajouté d'autres services comme la facturation au volume de données (et pas seulement selon le temps de connexion), l'accès simplifié aux réseaux en mode paquet et un débit adaptatif en fonction du besoin (allocation dynamique de canal).

Les débits proposés par les technologies **GPRS** (114 kbit/s) et **EDGE** (384 kbit/s), basées sur le GSM et son architecture, sont restés cependant insuffisants pour supporter avec succès les applications de l'Internet.

Les objectifs de la troisième génération qui a suivi sont donc multiples :

- transport de données de type voix et données à haut débit sur la même connexion ;
- coexistence avec les réseaux 2G, en particulier le GSM ;
- un réseau coeur IP ;
- extension du plan de fréquences pour faire face à la saturation des zones denses du GSM;
- introduction de classes de services différenciées ;
- possibilité de *roaming* au niveau mondial, et donc compatibilité entre tous les réseaux.

La technologie retenue en Europe pour la 3G est l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*).

Elle présente les caractéristiques suivantes :

- les tailles de cellule ne sont plus limitées à 0,2-30 km ;
- les bandes de fréquence sont centrées sur 2 GHz et non plus sur 900 MHz ;
- un multiplexage par code à large bande : W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) ; des débits théoriques suivant la taille de la cellule et la mobilité :
- 144 kbit/s pour une utilisation mobile rapide (voiture, train) en zone rurale,
- 384 kbit/s pour une utilisation piétonne en zone urbaine,
- 2 Mbit/s pour une utilisation fixe en zone urbaine.

b) Architecture

La figure 4.16 présente l'architecture du réseau UMTS avec la partie radio UTRAN (UMTS *Terrestrial Radio Access Network*) et le coeur du réseau (*Core Network*).

Le mobile nommé UE (*User Equipment*) est connecté *via* une liaison à 2 Mbit/s à la station de base nommée Node B qui dessert une cellule. Les Node B sont contrôlés par une RNC (*Radio Network Controller*), équivalent du BSC pour le GSM.

Les données en mode circuit pour la téléphonie sont transmises vers le réseau GSM. Les données en mode paquet sont envoyées vers un équipement spécifique (souvent colocalisé avec le MSC) : le SGSN (*Serving GPRS Support Node*) qui connecte les différents RNC et qui est chargé d'enregistrer les usagers d'une zone géographique dans une zone de routage. La liaison vers les réseaux à commutation de paquet extérieurs tels Internet est ensuite réalisée par une passerelle GGSN (*Gateway GPRS Support Node*). Les services de transmission par paquet du réseau GPRS sont donc en partie réutilisés.

Les bases de données contenant les informations d'abonnés (HLR, VLR, EIR et AUC) sont partagées entre les deux réseaux.

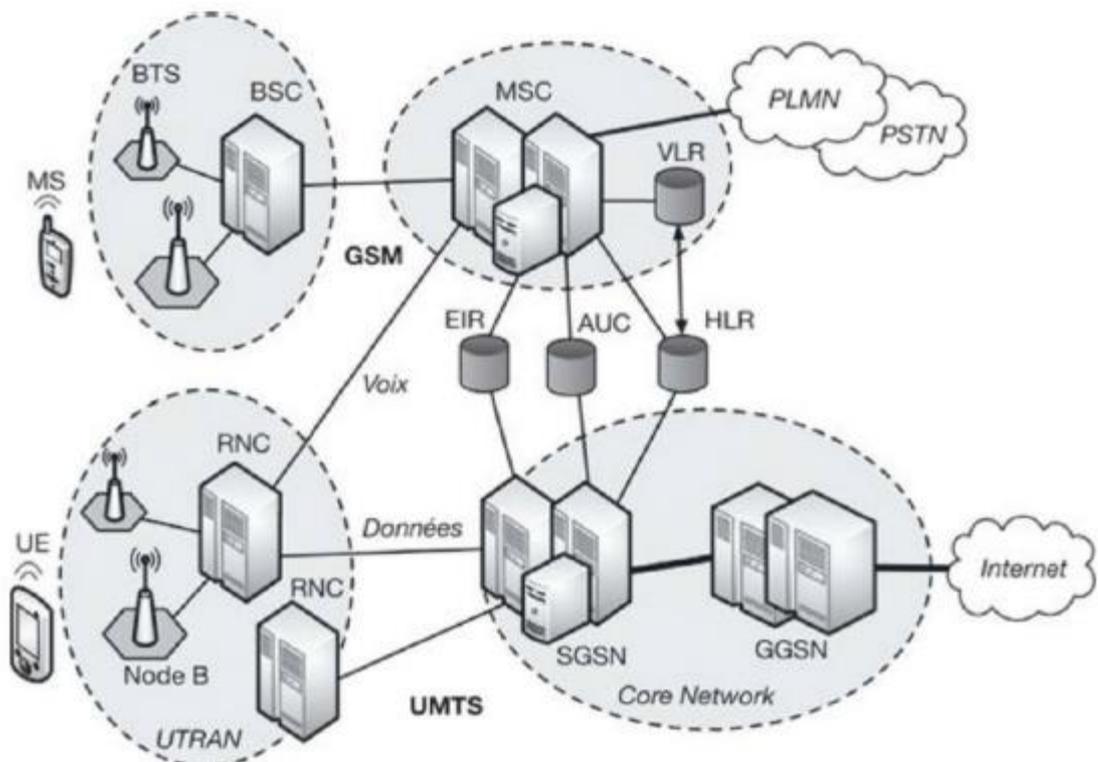


Figure 4.16. Architecture du réseau UMTS.

4.4.1.3. La 4G et le LTE

a) Caractéristiques

La technologie LTE (*Long Term Evolution*) est utilisée dans la dernière évolution de la 3G, la 3,9G, proche de la 4G avec laquelle elle est souvent confondue. La version évoluée du LTE, le LTE Advanced, est considérée comme une technologie de 4G à part entière.

Le LTE utilise en France plusieurs bandes de fréquences allant de 790 MHz à 2,7 GHz et permettant d'atteindre un débit théorique de 160 Mbit/s en liaison descendante. Les bandes dédiées au LTE sont la bande des 800 MHz et la bande des 2,6 GHz avec des canaux élémentaires de 2 MHz pour la première et des canaux de 5 MHz pour la deuxième. La bande des 1 800 MHz également utilisée est partagée avec le GSM. Ces bandes sont partagées par les différents opérateurs. La répartition pour les canaux montant (UL) et descendant (DL) est du type FDD (figure 7.28). Le LTE Advanced offre un débit descendant pouvant atteindre 1 Gbit/s sur les mêmes fréquences mais avec des canaux plus larges.

L'architecture du réseau LTE est proche de celle du réseau UMTS, les principales différences se situent sur les couches physique et liaison :

- multiplexage OFDMA (voir ci-dessous) pour la liaison descendante et SC-FDMA (*Single Carrier FDMA*) pour la liaison montante ;
- utilisation d'antennes multiples MIMO (*Multiple-input Multiple-Output*) ;
- codes correcteurs d'erreurs de type « Turbo Code » associés à des algorithmes de retransmission rapides ;
- modulations de type QPSK, 16QAM et 64QAM ;
- temps de latence (RTT) proches de 10 ms (contre 70 à 200 ms en UMTS).

4.5. Les systèmes satellite large bande

Le développement des VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) et maintenant des USAT (*Ultra Small Aperture Terminal*) est à l'origine de cette profusion d'antennes que l'on voit fleurir sur les toits et les balcons. L'utilisation du satellite s'étend pour aller des communications bande étroite au transport de canaux vidéo de très bonne qualité, en passant par les systèmes de communication *monovoies*, utilisant une seule direction pour les transmissions et les communications bidirectionnelles. Le nombre de satellites en orbite pour la diffusion de canaux de télévision ne cesse de croître. De nombreux standards ont été créés, comme DSS (*Direct Satellite System*). La compétition avec les réseaux câblés est de plus en plus forte, ces derniers bénéficiant d'une plus grande bande passante, ce qui leur autorise des services à haut débit, comme la télévision à la demande.

Chapitre 5 Tunneling Protocol

5.1. Les protocoles de liaison de données

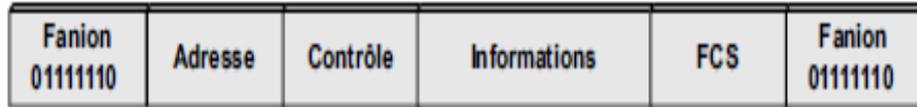
5.1.1. Le protocole HDLC (*High-Level Data Link Control*)

HDLC est le protocole normalisé par l'ITU (*International Telecommunications Union*), qui décrit une transmission en duplex intégral fonctionnant sur une liaison point à point ; la transmission est synchrone et orientée bit. Ce protocole met en oeuvre le mécanisme de transparence décrit en début de chapitre, ce qui le rend totalement indépendant du codage des données transportées. HDLC peut transporter des informations utilisant des codes de longueur variable. Sa variante la plus connue est de type Go-back-N avec un mécanisme de contrôle de flux. Il fonctionne en mode équilibré ou symétrique³, c'est-à-dire que les deux stations ont les mêmes prérogatives et peuvent éventuellement fonctionner selon un mode half-duplex.

5.1.1.1 STRUCTURE D'UNE TRAME HDLC

La trame est la structure unique de longueur quelconque qui transporte toutes les informations. Un fanion en marque le début et la fin ; un seul fanion marque la fin d'une trame et le début de la suivante lorsque deux trames sont émises consécutivement. La figure 5.1 décrit les différents champs de la trame, dans leur ordre d'apparition :

- Le champ *Address* s'étend sur un octet et identifie une des extrémités de la liaison.
- Le champ *Control* décrit le type de la trame : il s'étend sur 1 octet (sur 2 octets dans le *mode étendu*).
- Le champ *Information* est facultatif. Il contient un nombre quelconque d'éléments binaires représentant les données de l'utilisateur.
- Le champ FCS (*Frame Control Sequence*) est la séquence de contrôle de trame, obtenue par un contrôle polynomial dont le polynôme générateur vaut $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$. Ce polynôme générateur est celui préconisé par la recommandation *V41* de l'ITU.



Le champ de gauche est le premier transmis, le champ de droite est le dernier.

Figure 5.1. Format de base des trames HDLC

On commence par émettre les bits de poids faibles (du bit 1 au bit 8 de chaque champ). La transmission d'éléments binaires est continue ; en l'absence d'émission spécifique, les équipements émettent des suites de fanions pour maintenir la synchronisation entre les deux extrémités de la liaison de données. HDLC est un protocole qui utilise un mode de signalisation dans la bande. À cet effet, on distingue trois types de trames (figure 5.2).



Figure 5.2. Les fonctions et trames correspondantes d'HDLC.

Trois structures ont été définies pour le champ de contrôle (voir tableau E.1). Elles sont utilisées pour effectuer le transfert de trames d'information, numérotées ou non, de trames de supervision numérotées et de trames de commande non numérotées :

- **Structure de transfert de l'information (trame I).** La trame I permet d'effectuer le transfert de l'information. Les fonctions de N(S) et P/F sont indépendantes, chaque trame I contenant un numéro d'ordre N(S), un numéro d'ordre N(R), qui peut ou non accuser réception d'autres trames I à la station réceptrice, et un élément binaire P/F, qui peut être mis à 1 ou à 0.
- **Structure de supervision (trame S).** La trame S sert à réaliser les fonctions de commande de supervision de la liaison, comme l'accusé de réception, la demande de retransmission ou la demande de suspension temporaire de transmission. Les fonctions de N(R) et P/F sont indépendantes, chaque trame de

structure S contenant un numéro d'ordre N(R), qui peut ou non accuser réception d'autres trames I à la station réceptrice, et un élément binaire P/F, qui peut être mis à 1 ou à 0.

• **Structure non numérotée (trame U).** La trame U est utilisée pour effectuer les fonctions de commande de la liaison et pour le transfert d'informations non numérotées. Cette structure ne doit pas contenir de numéro d'ordre mais comprendre un élément binaire P/F, qui peut être mis à 1 ou à 0. Cinq positions d'élément binaire modificateur sont disponibles, ce qui permet de définir jusqu'à 32 fonctions de commande et 32 fonctions de réponse supplémentaires.

Format du champ de contrôle	Élément binaire du champ de contrôle							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Format I	0	N(S)			P	N(R)		
Format S	1	0	S	S	P/F	N(R)		
Format U	1	1	M	M	P/F	M	M	M

N(S)	numéro de séquence en émission (l'élément binaire 2 = élément binaire de poids faible).
N(R)	numéro de séquence en réception (l'élément binaire 6 = élément binaire de poids faible).
S	élément binaire de la fonction de supervision
M	élément binaire de la fonction de modification
P/F	élément binaire d'invitation à émettre lorsqu'il provient d'une commande ; élément binaire final lorsqu'il provient d'une réponse (1 = invitation à émettre/fin).
P	élément binaire d'invitation à émettre (1 = invitation à émettre)

Figure 5.3. Formats du champ de contrôle (les numéros sont exprimés modulo 8)

5.1.1.2. Fonctionnement d'HDLC

a) Établissement et rupture de connexion

La liaison étant dans l'état logique déconnecté (figure 5.4), le primaire demande l'établissement d'une liaison par l'envoi de trames non numérotées (U) de type SABM (mode équilibré ou LAP-B, *Link Access Protocol Balanced*) ou SARM (mode maître/esclave ou LAP), le bit P est positionné à 1 (il aurait pu être à 0). Le secondaire, s'il accepte la connexion, répond par la trame non numérotée UA, le positionnement du bit F, dans la réponse, est identique à celui du bit P. La liaison est établie, l'échange d'informations peut alors commencer.

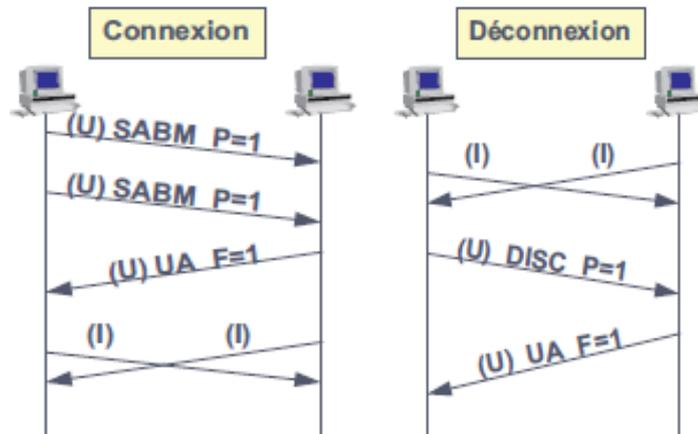


Figure 5.4. Gestion de la connexion sous HDLC.

La liaison est dans l'état logique connecté. Le primaire émet une demande de déconnexion DISC (figure 5.4), le bit P est positionné indifféremment à 1 ou à 0. Le secondaire accuse réception avec UA, la valeur du bit F correspond à celle du bit P de la trame DISC. La liaison est rompue. L'échange de fanions se poursuit pour maintenir la synchronisation tant que la liaison physique n'est pas rompue.

b) L'échange des données

La figure 5.5 illustre les différentes étapes d'un échange HDLC. Chaque entité correspondante entretient 2 compteurs dits **variables d'état**, le compteur V(s) indique le numéro de la prochaine trame à émettre, le compteur V(r) le numéro de la trame attendue. Après la phase de connexion les compteurs sont initialisés à zéro de chaque côté, la fenêtre étant de 7 (dans cet exemple), chaque entité a un crédit d'émission de 7 (ligne 1). En ligne 2, la machine A émet une trame, les compteurs N(s) et N(r) contiennent respectivement les valeurs V(s) et V(r) de la ligne 1. Les valeurs V(s), V(r) et crédit de la ligne 2 correspondent aux valeurs, mises à jour après émission de la trame pour la machine A et après sa réception pour la machine B. C'est-à-dire, que dans la figure, les valeurs des compteurs correspondent toujours aux valeurs mises à jour après réception ou émission d'une trame. Les lignes 3, 4, 5 n'appellent aucun commentaire particulier. En ligne 6, la machine B émet une trame. Son compteur Vr contient la valeur de la trame attendue, ici 4, il correspond pour la machine B à un acquittement des [N(s) - 1] trames émises, soit ici les trames 0, 1, 2 et 3. Les mémoires tampons sont libérées, la fenêtre est réinitialisée (crédit de 7).

Cette technique d'acquittement simultané à l'envoi de données, dite du *piggybacking*, optimise l'échange de données et évite un blocage de la fenêtre.

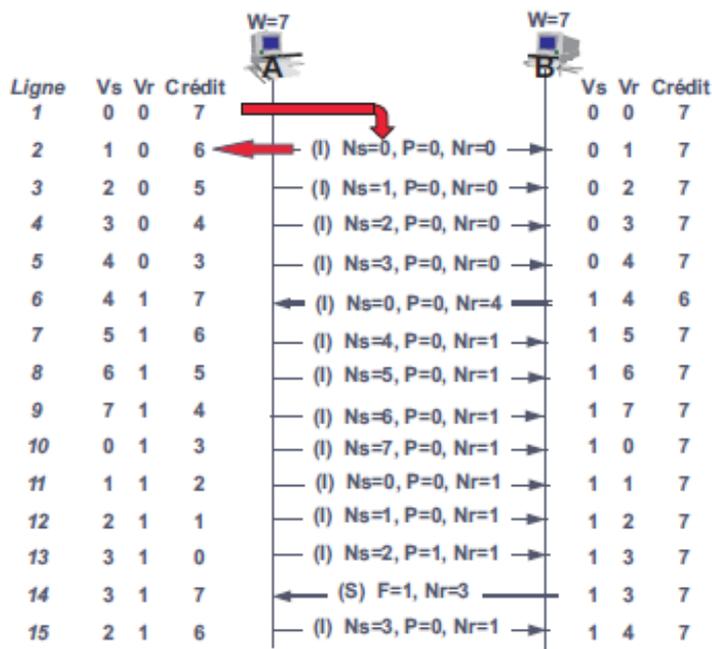


Figure 5.5. L'échange de données et la gestion de la fenêtre.

L'échange se poursuit, la fenêtre de A s'incrémente. En ligne 12, le crédit n'est plus que d'une trame, il sera nul à l'émission de la trame suivante (ligne 13). La trame émise demande alors un acquittement à B. N'ayant pas de données à envoyer, B acquitte, les trames reçues, avec une trame de supervision RR (Receive Ready). Il indique à A que cette trame est la réponse à sa demande en positionnant le bit F à 1.

d) Gestion des temporisations

Deux temporisateurs (figure 5.6) sont gérés par les entités communicantes :

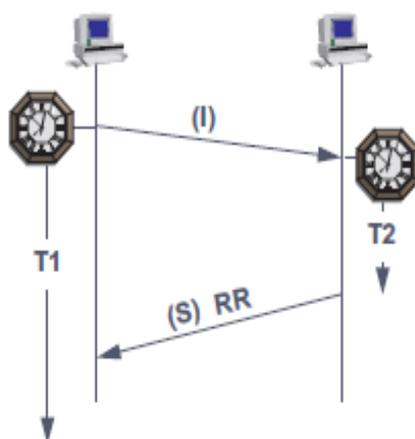


Figure 5.6. Gestion des temporisations.

- La **temporisation de retransmission (T1 ou RTO, Retransmission Time Out)**, à chaque trame émise l'émetteur initialise le temporisateur T1. Si, à l'échéance de ce temporisateur ou délai de garde, l'émetteur n'a pas reçu de trame d'information ou d'acquittement de son correspondant, il réémet la trame supposée perdue.
- La **temporisation d'acquittement (T2)** correspond au délai maximum au bout duquel, le récepteur, s'il n'a pas de données à transmettre, doit envoyer un acquittement à son correspondant.

e) *Gestion des erreurs*

La figure 5.7 illustre la reprise sur erreur. Supposons la trame 2 erronée, elle est ignorée par le récepteur. La trame 3 est alors reçue hors séquence, elle est rejetée. La machine B émet alors une trame de supervision de rejet (REJ, *Reject*) en indiquant à A à partir de quelle trame il doit reprendre la transmission [$N(r) = 2$]. Toutes les trames dont la valeur de N_s est supérieure à 2 sont alors rejetées (rejet simple).

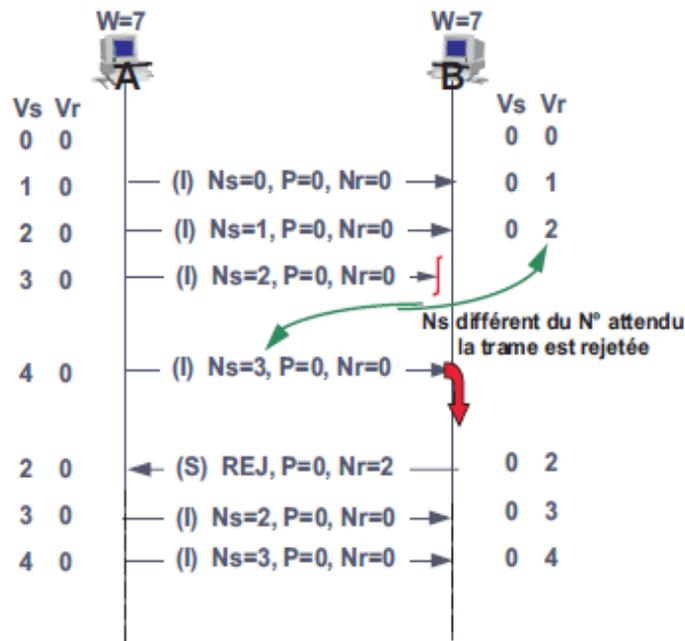


Figure 5.7 *Gestion des erreurs.*

La machine A reprend la transmission à partir de la trame 2 ($N_s = 2$). Si, suite à la trame erronée, A n'avait plus de données à émettre, B n'aurait pas détecté le déséquencement. C'est A qui, à l'échéance du temporisateur T1, aurait pris l'initiative de retransmettre la trame 2. *Gestion du contrôle de flux HDLC* utilise le contrôle de flux implicite. La fenêtre est paramétrée à l'installation du logiciel ou négociée lors

de la connexion par le protocole de niveau supérieur. En cas de saturation des tampons de réception, le récepteur, ici dans la figure 5.8 la machine B, rejette la trame en excès et informe A de son incapacité temporaire à accepter de nouvelles données. Il émet la trame « S » **RNR** (*Receive Not Ready*) avec le compteur Nr positionné au numéro de la trame reçue et rejetée.

La machine A prend en compte cette demande et interroge (*poll*) régulièrement (tous les T1) la machine B, pour d'une part signaler sa présence et d'autre part formuler auprès de B une demande de reprise de transmission à l'aide de la trame « S » **RR**, *Receive Ready*, avec le bit P à 1.

Lorsque B peut reprendre la réception, il le signale à l'émetteur en accusant réception à l'aide de la trame « S » **RR**. Le compteur N(r) contient le numéro à partir duquel la retransmission doit reprendre. A avait positionné le bit P à 1, la réponse de B est émise avec le bit F à 1.

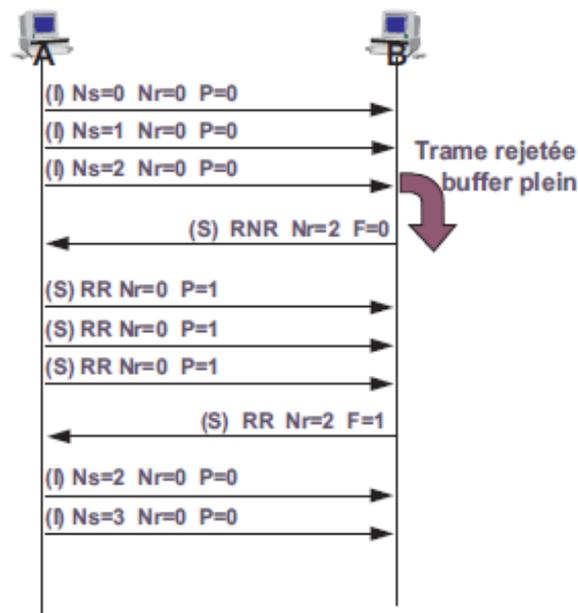


Figure 5.8 Gestion du contrôle de flux.

5.1.1.3. Les différentes versions du protocole HDLC

Normalisé en 1976 (CCITT et ISO) HDLC a inspiré de nombreuses variantes :

- mode **LAP** (*Link Access Protocol*), fonctionnement sur sollicitation du primaire ;
- mode **LAP-B** (B pour *Balanced*, mode équilibré), dans ce type de liaison, il n'y a pas de primaire prédéfini, chaque station peut être primaire ;
- mode **LAP-D** (D pour canal D), ce protocole similaire à LAP-B est utilisé dans les réseaux numériques (RNIS) ;
- mode **LAP-M** (M pour Modem), dérivé de LAP-D, il est mis en oeuvre pour des connexions

PC-Calculateur hôte, ce protocole est utilisé dans les modems conformes aux recommandations V.42 et V.42 bis ;

– mode **LAP-X**, mode semi-duplex dérivé de LAP-D, est utilisé dans le télétext.

Notons que **SDLC**, *Synchronous Data Link Control*, utilisé dans l'environnement **IBM SNA**, *System Network Architecture*, est parfois présenté comme un sous-ensemble d'HDLC car moins riche ; cependant, il est plus logique de présenter HDLC comme une évolution de SDLC. SDLC ne fonctionne qu'en mode non équilibré.

5.1.1.4. Conclusion

HDLC, en version LAP-B, est utilisé dans les réseaux de type X.25 (exemple : Transpac). Les contrôles d'erreur et de flux sont effectués de point à point (noeud à noeud). Cette technique est efficace mais pénalise gravement les performances d'HDLC. L'évolution des techniques réseaux (fibres optiques) rend les supports plus fiables (taux d'erreur plus faible) et autorise une simplification des protocoles. En confiant aux calculateurs d'extrémité (ceux qui sont connectés au réseau), les tâches de contrôle d'erreur et de contrôle de flux, la technique du relais de trames (*Frame Relay* ou LAP-F) permet des débits effectifs plus élevés (34 368 kbit/s).

5.2. PPP, Point to Point Protocol et PPP over Internet

Le protocole PPP (Point-to-Point Protocol) est utilisé dans les liaisons d'accès au réseau Internet ou sur une liaison entre deux routeurs. Son rôle est essentiellement d'encapsuler un paquet IP afin de le transporter vers le noeud suivant. Tout en étant fortement inspiré du protocole HDLC, sa fonction consiste à indiquer le type des informations transportées dans le champ de données de la trame. Le réseau Internet étant multiprotocole, il est important de savoir détecter, par un champ spécifique de niveau trame, l'application qui est transportée de façon à pouvoir l'envoyer vers la bonne porte de sortie. La trame du protocole PPP ressemble à celle de HDLC. Un champ déterminant le protocole de niveau supérieur vient s'ajouter juste derrière le champ de supervision. La figure 5.9 illustre la trame PPP

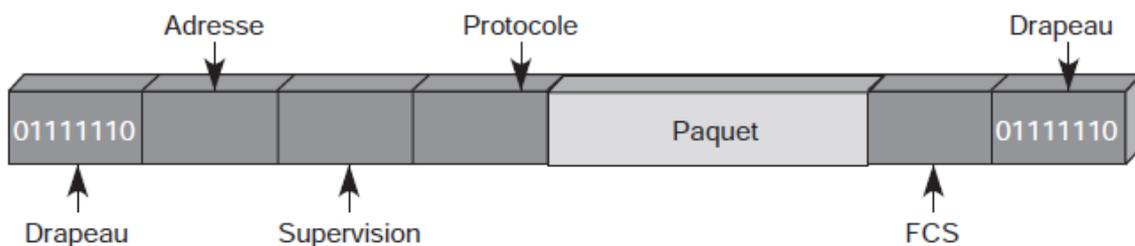


Figure 5.9. Structure de la trame PPP.

Les valeurs les plus classiques du champ de protocole sont les suivantes :

- 0x0021 : protocole IPv4 ;
- 0x002B : protocole IPX (Internetwork Packet eXchange) ;
- 0x002D : TCP/IP en-tête compressé ;
- 0x800F : protocole IPv6.

Par extension, PPP a été implémenté sur des couches liaison ou réseau comme Ethernet (*PPP over Ethernet*) ou ATM (*PPP over ATM*). Quel que soit le support utilisé « en dessous » (Ethernet, ATM...), une liaison PPP transportera les mêmes données « au-dessus » (figure 5.10) : un paquet IP, qui lui-même encapsulera un segment TCP ou UDP, qui lui-même intégrera des messages HTTP, SMTP, POP3, FTP...

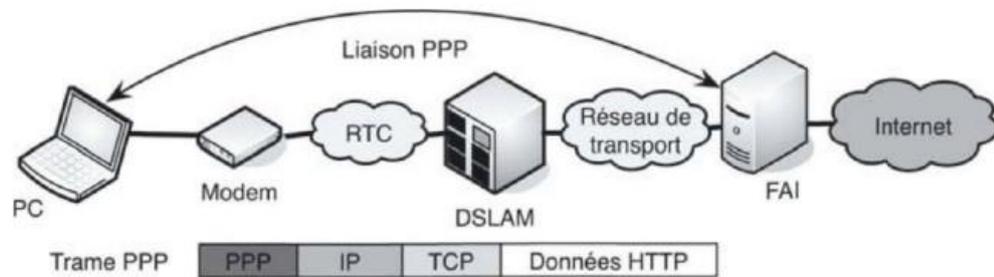


Figure 5.10. Liaison PPP et trame PPP.

Pour une connexion de type ADSL, des protocoles supplémentaires seront nécessaires pour adapter PPP au réseau traversé (figure 5.11) :

- PPPoE (*PPP over Ethernet*) permet d'adapter PPP pour le réseau local Ethernet du client ou de son FAI (Fournisseurs d'Accès Internet) ;
- PPPoA (*PPP over ATM*) pour adapter PPP au réseau de transport ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) ; La trame PPP peut être encapsulée dans plusieurs trames ATM après avoir été découpée en morceaux de 48 octets par le biais du protocole AAL-5 (ATM Adaptation Layer de type 5).
- PPTP (*Point to Point Tunneling Protocol*) pour créer un tunnel VPN (*Virtual Private Network*) sécurisé entre deux clients distants.

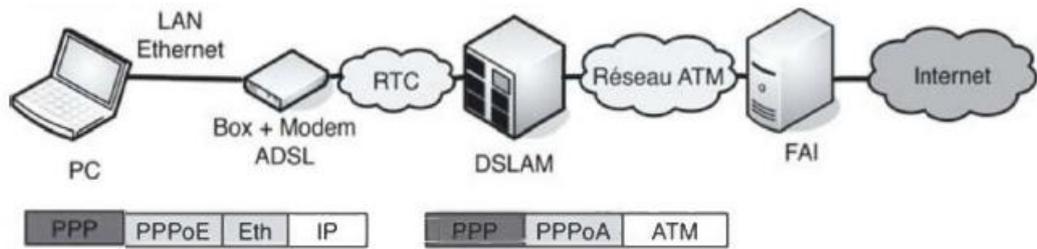


Figure 5.11. *Différentes encapsulations PPP.*

Le protocole PPP fonctionne en plusieurs étapes : après contrôle de la liaison (activation de la ligne, test et négociation des options) et authentification de l'abonné, les paquets IP sont découpés et encapsulés dans des trames au format PPP. Pour réaliser ces différentes étapes, PPP apporte quatre éléments :

- une méthode pour encapsuler les datagrammes IP, donc pour délimiter de façon non ambiguë la fin d'une trame et le début de la suivante ;
- un protocole de contrôle de liaison (LCP, *Link Control Protocol*) qui active la ligne, la teste, négocie les options et la désactive ;
- un protocole d'authentification, généralement CHAP (*Challenge Handshake Authentication Protocol*);
- la possibilité de négocier les options de la couche réseau indépendamment du protocole associé ; la méthode choisie consiste à avoir un protocole intermédiaire de contrôle de réseau (NCP, *Network Control Protocol*) différent pour chaque couche réseau supportée.

5.2.1. Conclusion

Le protocole de liaison de données supervise le circuit de données et définit un ensemble de règles pour assurer la fiabilité des échanges. Il spécifie le format des trames, les moyens de contrôler leur validité, ainsi que les règles du dialogue entre les deux extrémités de la liaison. Il exerce aussi un contrôle de flux pour maîtriser le rythme d'envoi des informations et valider la réception des informations reçues. HDLC est un exemple de protocole normalisé très répandu, qui gère des trames de données à l'aide de trames de supervision. Il fonctionne en full-duplex et permet la reprise sur erreur. Il garantit en outre l'ordre des données. PPP, utilisé dans Internet, en est une version très simplifiée qui n'exerce pas de contrôle de flux mais propose plusieurs modes d'échanges de données, négociées avant tout transfert de données entre les deux extrémités de la liaison.

5.3. Le protocole L2TP

Pour réaliser les communications entre les BAS et les serveurs, un protocole de tunneling doit être mis en place puisque ce chemin peut être considéré comme devant être emprunté par tous les paquets

ou trames provenant des différents DSLAM et allant vers le même serveur. Le tunneling est une technique courante, qui ressemble à un circuit virtuel. Les trois protocoles utilisés pour cela sont PPTP (Point-to-Point Tunneling Protocol), L2F (Layer 2 Forwarding) et L2TP (Layer 2 Tunneling Protocol). Ces protocoles permettent l'authentification de l'utilisateur, l'affectation dynamique d'adresse, le chiffrement des données et éventuellement leur compression. Le protocole le plus récent, L2TP, supporte difficilement le passage à l'échelle, ou scalabilité, et n'arrive pas à traiter correctement et suffisamment vite un nombre de flots dépassant les valeurs moyennes. Dans ce cas, on ajoute des concentrateurs d'accès L2TP, ou LAC (L2TP Access Concentrator), qui récupèrent tous les clients provenant d'un même DSLAM et allant vers un même BAS et les multiplexent sur un même circuit virtuel. La figure 5.12 illustre l'architecture protocolaire d'une communication d'un PC vers un serveur situé dans un réseau d'ISP différent de celui de l'opérateur d'entrée. Le PC travaille sous TCP/IP et est connecté à un modem ADSL par le biais d'un réseau Ethernet.

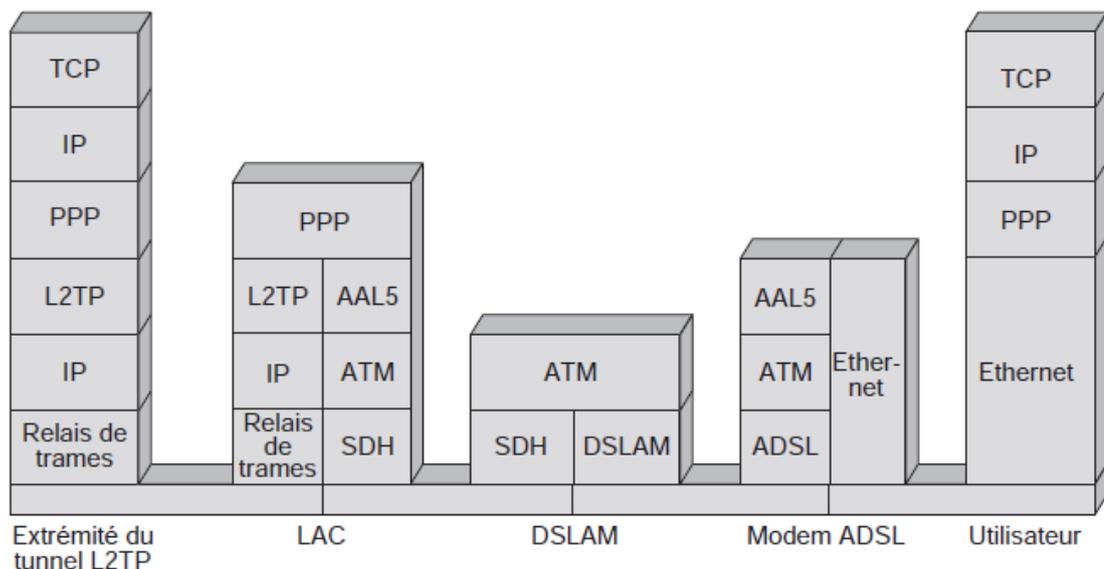


Figure 5.12. Architecture protocolaire d'une communication ADSL

5.4. VPN

Définitions

Un réseau privé est dit virtuel (**VPN**, *Virtual Private Network*) lorsque, sur une infrastructure partagée (réseau public ou privé), on développe des mécanismes tels que la communication ne soit possible qu'entre clients du VPN. Les mécanismes utilisés peuvent être un simple identifiant de VPN ou une technique de chiffrement des communications. Seuls peuvent établir une communication, les clients

utilisant le même identifiant ou possédant la même clé de chiffrement/déchiffrement. Les VPN MPLS appartiennent à la première catégorie. On distingue deux modes de réalisation des VPN MPLS, le modèle « *overlay* » et le modèle « *peer* » dit encore modèle « homologue ».

Le modèle « overlay »

Réaliser un VPN *overlay* consiste à relier les sites clients par des circuits virtuels permanents. L'interconnexion des sites clients est réalisée par la définition d'un ensemble de circuits virtuels. Les relations sont du type point à point. La figure 5.13 illustre une relation de type *overlay* entre deux sites.



Figure 5.13. Principe du modèle *overlay*.

Dans ce modèle, le circuit virtuel est établi du site client A au site client B. Le routeur du site client est dénommé routeur **CE** (*Customer Edge Router*), le routeur d'accès au réseau partagé (routeur **PE**, *Provider Edge Router*). Si l'approche théorique de ce modèle est simple, la réalisation de réseaux VPN *overlay* est relativement complexe. Il faut définir avec précision les relations entre sites et créer autant de circuits virtuels que de relations point à point à émuler. Le nombre de circuits à définir croît comme le carré du nombre de sites ($N [N-1]/2$). Compte tenu du nombre de circuits à définir, les réseaux VPN *overlay* réalisent rarement un maillage complet. Dans ce cas, certains sites sont définis comme sites de transit, ce qui nécessite une étude volumétrique précise des flux entre les sites (figure 5.14).

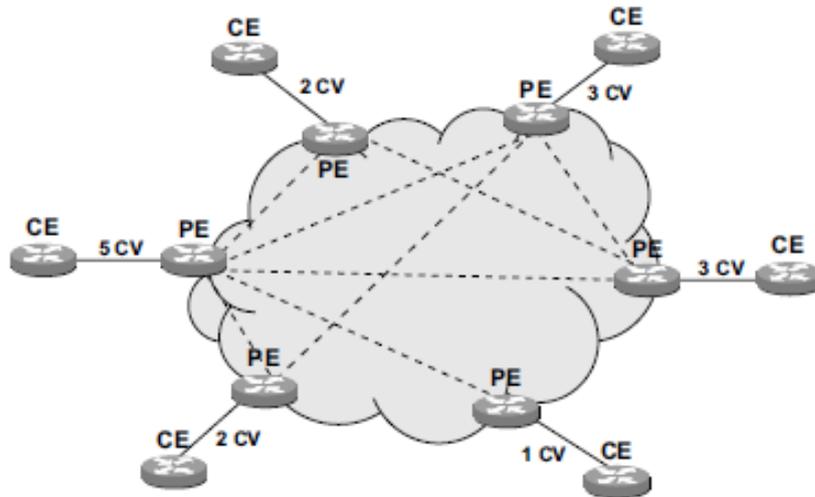


Figure 5.14. Exemple de VPN overlay.

Dans le réseau exemple de la figure 5.14, le VPN construit entre tous les sites représentés chacun par leur routeur client (CE) ne comportent que huit circuits virtuels dans l'infrastructure partagée. La communication entre certains sites transite par d'autres sites clients¹. Chaque noeud du réseau opérateur contient une entrée pour chaque circuit virtuel défini entre les sites clients. Indépendamment de la difficulté que peut présenter la gestion d'un nombre important de circuits virtuels, l'ajout d'un site à un VPN n'est pas transparent à l'infrastructure du réseau opérateur. Le modèle homologue ou *peer* remédie à cette difficulté.

Le modèle peer

Dans le modèle *peer* (figure 5.15), les VPN sont ignorés du coeur de réseau, les données échangées entre les clients d'un même VPN sont acheminées dans le réseau comme des données ordinaires. Les informations relatives aux VPN sont échangées entre le routeur client (CE, *Customer Edge*) et le routeur de périphérie (PE, *Provider Edge*). Seuls les routeurs de périphérie du réseau ont connaissance des VPN, le routage des données en est facilité. Les routeurs de coeur de réseau (**P Router**, *Provider router*) n'ont plus de nombreux circuits virtuels à gérer et l'ajout d'un client n'a aucun impact sur le réseau, de ce fait, l'évolution des VPN *peer* est aisée.

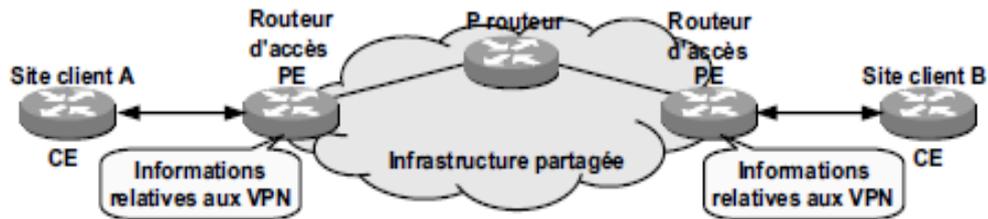


Figure 5.15. Principe des VPN peer.

5.4. IPsec (IP sécurisé)

Le monde TCP/IP permet d'interconnecter plusieurs millions d'utilisateurs, lesquels peuvent souhaiter que leur communication reste secrète. Internet transporte de plus un grand nombre de transactions de commerce électronique, pour lesquelles une certaine confidentialité est nécessaire, par exemple pour prendre en charge la transmission de numéros de carte bancaire.

L'idée développée dans les groupes de travail sur la sécurité du commerce électronique dans le monde IP consiste à définir un environnement contenant un ensemble de mécanismes de sécurité. Les mécanismes de sécurité appropriés sont choisis par une association de sécurité (*voir ci-après*). En effet, toutes les communications n'ont pas les mêmes caractéristiques, et leur sécurité ne demande pas les mêmes algorithmes. Chaque communication se définit par sa propre association de sécurité. Les principaux éléments d'une association de sécurité sont les suivants :

- algorithme d'authentification ou de chiffrement utilisé ;
- clés globales ou spécifiques à prendre en compte ;
- autres paramètres de l'algorithme, comme les données de synchronisation ou les valeurs d'initialisation ;
- durée de validité des clés ou des associations ;
- sensibilité de la protection apportée (secret, top secret, etc.).

La solution IPsec introduit des mécanismes de sécurité au niveau du protocole IP, de telle sorte qu'il y ait indépendance vis-à-vis du protocole de transport. Le rôle de ce protocole de sécurité est de garantir l'intégrité, l'authentification, la confidentialité et la protection contre les techniques jouant des séquences précédentes. L'utilisation des propriétés d'IPsec est optionnelle dans IPv4 et obligatoire dans IPv6. Une base de données de sécurité, appelée SAD (Security Association Database), regroupe les caractéristiques des associations par l'intermédiaire de paramètres de la communication. L'utilisation de ces paramètres est définie dans une autre base de données, la SPD (Security Policy Database). Une entrée de la base SPD regroupe les adresses IP de la source et de la destination, ainsi que l'identité de

l'utilisateur, le niveau de sécurité requis, l'identification des protocoles de sécurité mis en oeuvre, etc. Le format des paquets IPsec est illustré à la figure 5.16. La partie la plus haute de la figure correspond au format d'un paquet IP dans lequel est encapsulé un paquet TCP. La partie du milieu illustre le paquet IPsec. On voit que l'en-tête IPsec vient se mettre entre l'en-tête IP et l'en-tête TCP. La partie basse de la figure montre le format d'un paquet dans un tunnel IPsec. La partie intérieure correspond à un paquet IP encapsulé dans un paquet IPsec de telle sorte que le paquet IP intérieur soit bien protégé.

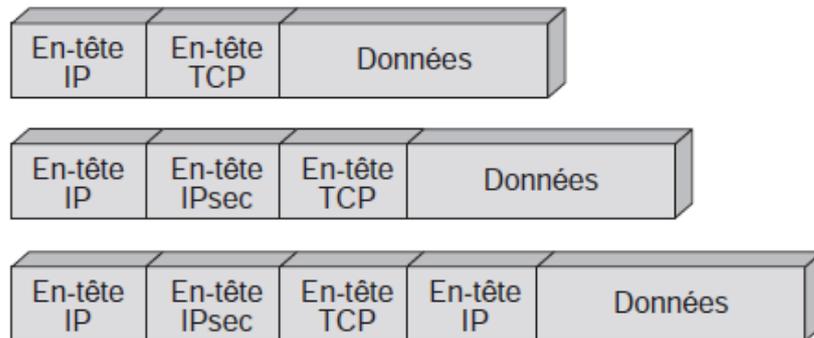


Figure 5.16. *Format des paquets IPsec*

Dans un tunnel IPsec, tous les paquets IP d'un flot sont transportés de façon totalement chiffrée. Il est de la sorte impossible de voir les adresses IP ni même les valeurs du champ de supervision du paquet IP encapsulé. La figure 5.17 illustre un tunnel IPsec.

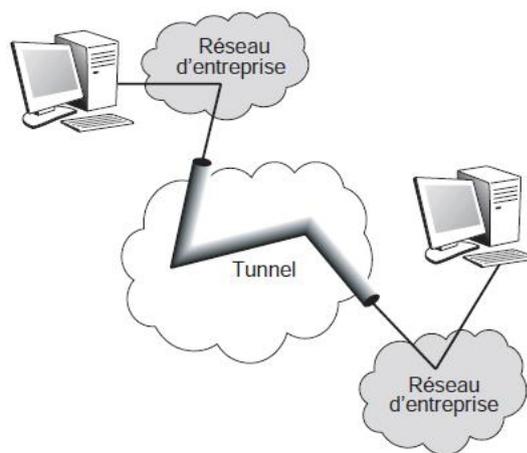


Figure 5.17. *Tunnel IPsec*

Références bibliographique:

1. Kim - Loan Thai, Véronique Vèque, Simon Znaty, "Architecture des Réseaux hauts débit cour, exercice et corrigés", 1995
2. Stéphane Lohier, Doménique Present , " Réseaux et transmissions, Protocoles, infrastructures et services", 6eme édition, 2016.
3. Claude Servin," RÉSEAUX ET TÉLÉCOMS Cours et exercices corrigés", 2eme édition, 2003.
4. Claude Servin, " RÉSEAUX ET TÉLÉCOMS Cours et exercices corrigés", 4eme édition.
5. Daniel Kofman, Maurice Gagnaire, " RESEAUX HAUT DEBIT. Tome 1, Réseaux ATM et réseaux locaux", 2ème édition,1998
6. Gul pujolle, Olivier salvatori, "LES RÉSEAUX", 5ème édition ,2006.
7. Gul pujolle, Olivier Salvatori, Jacques Nozick, " LES RÉSEAUX Annexesc", édition 2014.
8. Danièle DROMARD, Dominique SERET, "Architecture des réseaux",2009.
9. 9-BEUCHOT Gérard, "téléinformatique Tome1 base technique pour les réseaux", édition 1995
10. Sami Baraketi. "Ingénierie des réseaux optiques SDH et WDM et étude multicouche IP/MPLS sur OTN sur DWDM". Réseaux et télécommunications . Université Toulouse III Paul Sabatier, 2015. Français.