Chapitre **13**

Introduction aux réseaux de transport

13.1 GÉNÉRALITÉS

Un réseau peut être vu comme étant la superposition de trois plans (figure 13.1) :

- 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.

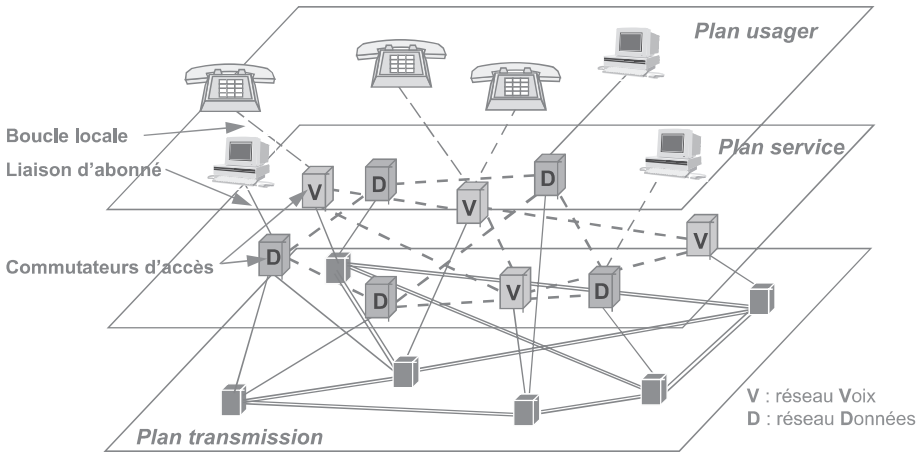

Figure 13.1 Les trois plans d'un réseau de transmission.

Ce chapitre concerne l'étude des plans de transmission, de service et des modes d'accès à ce dernier.

13.2 LE PLAN DE TRANSMISSION

13.2.1 Généralités

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 13.2). 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.

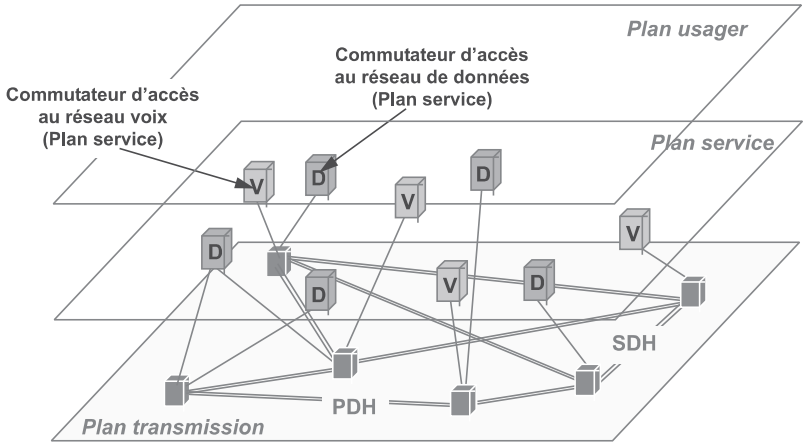

Figure 13.2 Le plan de transmission.

Outre la rationalisation de l'utilisation des supports, la hiérarchie PDH a eu le mérite de résoudre les difficultés de synchronisation des flux provenant de sources différentes aux horloges proches (plésio) mais non identiques. Fondée sur un réseau de distribution d'horloge, la hiérarchie synchrone (**SDH**, *Synchronous Digital Hierarchy*) garantit la délivrance des bits en synchronisme d'une horloge de référence. Elle autorise des débits plus élevés, apporte des solutions d'administration et de contrôle et enfin répond à un besoin de normalisation des interfaces optiques.

Si les cœurs des réseaux sont aujourd'hui SDH, pour des raisons historiques, la distribution des débits chez l'utilisateur repose toujours sur la hiérarchie plésiochrone. L'adage qu'une technologie ne supplante jamais une autre, mais vient la compléter prend ici toute sa valeur (figure 13.3).

13.2.2 La synchronisation des réseaux

Horloges et mécanismes associés

Les références temporelles dans un réseau sont fournies à partir d'oscillateurs. Indépendamment du fait qu'il n'est pas possible de réaliser des oscillateurs de fréquences strictement identiques,

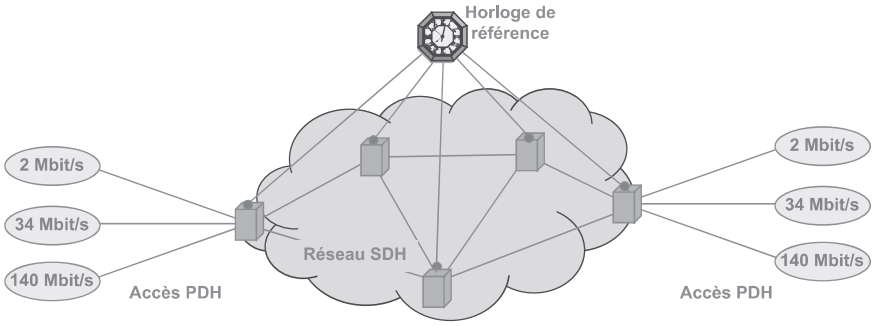

Figure 13.3 La cohabitation des techniques PDH et SDH.

les signaux d'horloge déduits du signal binaire subissent les mêmes altérations que ce dernier. Même lorsque les différentes horloges du réseau sont asservies à une horloge de référence unique, des écarts subsistent. Les différences d'horloge provoquent des différences de débits (figure 13.4) et sont, aujourd'hui, la principale source d'erreur dans les réseaux (**saut de bits**).

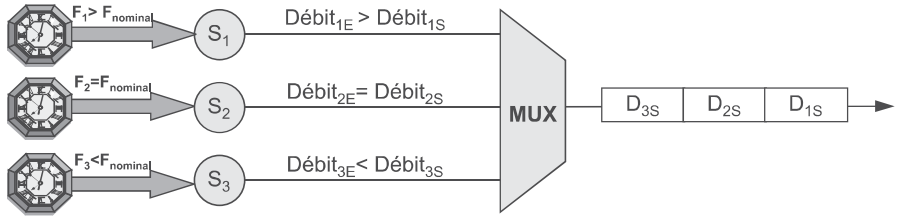

Figure 13.4 Les écarts d'horloge et de débit.

Les signaux d'horloge subissent deux types d'altération, l'une et l'autre correspondent à des variations de la fréquence d'horloge autour d'une valeur moyenne. La première est une variation rapide autour de la fréquence nominale, le cycle est répétitif plusieurs fois par seconde, il s'agit du phénomène connu sous le nom de **gigue**[1] ou *jitter*. La gigue s'exprime en amplitude de la variation autour de la fréquence moyenne, elle varie de 10^{-5} à 10^{-6}.

La seconde, beaucoup plus lente, s'appelle dérapage ou glissement, son cycle peut être très grand. C'est, par exemple, la variation de fréquence due aux variations de température durant la journée.

Pour remédier à ces écarts d'horloge et donc de débit, plusieurs solutions sont envisageables. La plus simple consiste à régénérer périodiquement le signal, les **répéteurs** ou **régénérateurs** non seulement restaurent le signal (forme et amplitude) mais peuvent aussi recalibrer le signal autour d'une fréquence moyenne (figure 13.5).

Cependant, les bits sont reçus par les éléments actifs au rythme de l'horloge source, ils sont réémis au rythme de l'horloge émission du système. Si le rythme de l'horloge source est supérieur

1. La gigue, dans les réseaux, a deux origines. Celle évoquée ici correspond aux fluctuations d'horloge, elle est quantifiable et engendre des décalages temporels entre les bits provoquant éventuellement des erreurs (saut de bits). L'autre dépend essentiellement de la charge du réseau et de ses variations, elle n'engendre pas d'erreur binaire mais peut rompre, éventuellement, l'isochronie des paquets de données.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

à celui de l'horloge émission, le système reçoit plus de bits qu'il ne peut en émettre. Il est alors nécessaire de mémoriser les bits excédentaires en attente d'une dérive inverse de l'horloge source. En principe, les variations d'horloge s'annulent ainsi, les bits reçus en excédant durant une période pourront être émis à la période suivante. Pour limiter la taille des mémoires tampons, l'UIT-T a fixé des limites aux dérives d'horloge, celles-ci devant être d'autant plus faibles que les débits sont importants.

Figure 13.5 La régénération du signal par un répéteur.

La figure 13.6 représente un système de correction de gigue. La mémoire tampon (*buffer*) de réception est constituée par un registre à décalage « élastique ». Le *buffer* est plus ou moins rempli selon les écarts de rythme entre l'horloge de réception (Hr) et l'horloge d'émission (He). Ce dispositif est efficace, mais il introduit un retard (temps de rétention des bits).

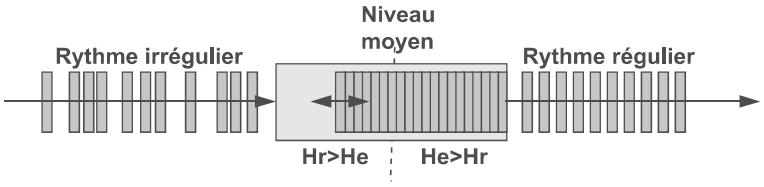

Figure 13.6 Principe de la correction de gigue d'horloge.

Quelle que soit la technique utilisée pour asservir les horloges, on ne peut garantir un synchronisme parfait de toutes les horloges d'un réseau. Ainsi, lors des opérations de multiplexage, les différentes voies incidentes peuvent avoir des rythmes d'horloge différents. Les dispositifs précédents ne suffisent plus. La seule solution envisageable consiste à organiser dans le train d'émission une position variable des débits affluents (cadrage). Ce principe, illustré par la figure 13.7, est utilisé aussi bien dans la hiérarchie plésiochrone (justification au niveau bit) que dans la hiérarchie synchrone (justification au niveau octet). Un pointeur permet de déterminer où débutent les données.

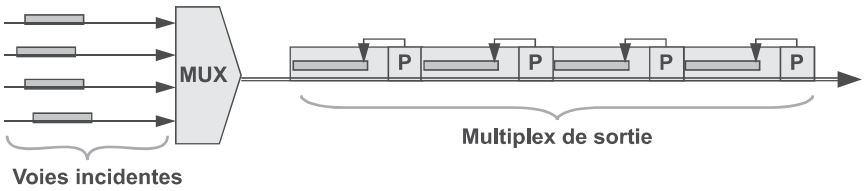

Figure 13.7 Principe de la justification.

Afin de permettre le cadrage des données, le débit du multiplex de sortie est nécessairement plus élevé que la somme des débits des voies incidentes, ce surdébit est dit surdébit de justification. Seule l'utilisation conjuguée de surdébit et de pointeurs associés autorise une compensation dynamique non seulement des différences d'horloge mais aussi des écarts de phase introduits par les différences de trajet (temps de propagation) des différents affluents. La figure 13.8 illustre le principe de la justification au niveau bit par bit de cadrage.

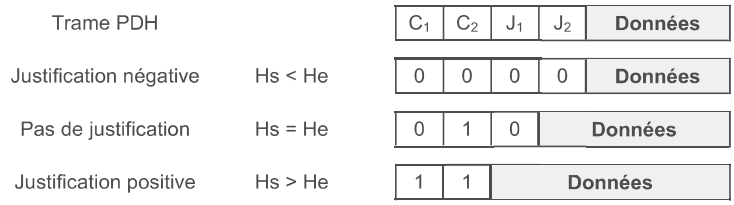

Figure 13.8 Principe de la justification dans les trames PDH.

La justification est nulle quand la fréquence d'horloge du train incident (Hs) est identique à celle du train d'émission (He), c'est-à-dire que le débit binaire incident correspond exactement au débit binaire nominal d'émission. Si le train de bits incident est supérieur à la capacité nominale d'émission, elle est dite positive et négative dans le cas inverse. Dans l'exemple de la figure 13.8, l'écart maximal des horloges a été supposé limité à 1 bit. La position des données dans la trame varie donc de ± 1 bit, par rapport à une position de référence. Les bits C_1 et C_2 indiquent, lorsqu'ils sont positionnés à 1, que le bit de justification correspondant (C_1 pour J_1 et C_2 pour J_2) contient un bit de donnée. Lorsqu'ils ne sont pas utilisés, les bits de justification J_1 et J_2 et d'indication (C_1 et C_2) sont à 0.

La distribution d'horloge dans un réseau SDH

Il existe deux modes de synchronisation des réseaux. Le mode synchronisation mutuelle et le mode maître-esclave ou mode hiérarchique. Dans le mode synchronisation mutuelle, tous les nœuds du réseau sont considérés au même niveau. Chaque nœud détermine, à partir des signaux incidents, une horloge moyenne et y aligne la sienne. Cette méthode est peu utilisée, on lui préfère une synchronisation de type hiérarchique. Le réseau de distribution d'horloge[2] est organisé sur trois niveaux (figure 13.9).

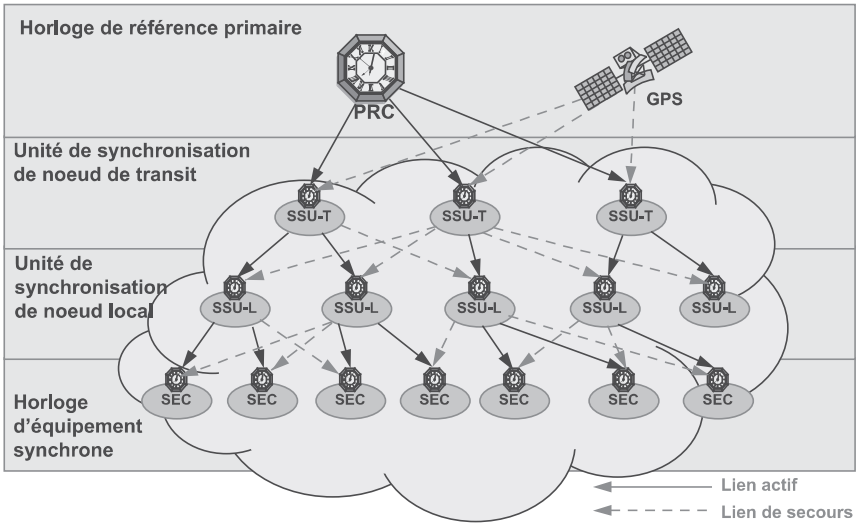

Figure 13.9 La synchronisation maître-esclave dans un réseau SDH.

2. La distribution d'horloge n'est pas réservée aux réseaux SDH, elle peut aussi être utilisée dans les réseaux PDH.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

Le rythme de référence primaire (**PRC**, *Primary Reference Clock*, horloge primaire de référence) est fourni par une horloge au césium[3] de grande stabilité (10^{-11}). À des fins de sécurité, cette horloge est doublée. Certains opérateurs utilisent des récepteurs **GPS** (*Global Positionning System*). Cette dernière approche, bien qu'elle soit sous le contrôle du ministère de la Défense américain (DoD), tend à se répandre. Le GPS peut être utilisé comme horloge principale mais, le plus souvent, il est employé comme horloge de secours.

Afin de rétablir un lien de synchronisation, en cas de défaillance d'un nœud de niveau supérieur, le réseau de distribution d'horloge assure une redondance des liens. Le tableau de la figure 13.10 détaille les différents niveaux de distribution d'horloge, il indique les normes de référence et la stabilité des horloges de chaque niveau.

Abréviation	Appellation	Avis UIT-T	Stabilité
PRC	*Primary Reference Clock* Horloge primaire de référence	G.811	10^{-11} sur le long terme
SSU-T	*Synchronisation Supply Unit Transit* Unité de synchronisation de nœud de transit	G.812T	50•10⁻ Dérive maxi. sur 24 h. •10^{-9}
SSU-L	*Synchronisation Supply Unit Local* Unité de synchronisation de nœud de transit	G.812L	10^{-8} Dérive maxi. sur 24 h. 2•10^{-8}
SEC	*Synchronous Equipement Clock* Horloge d'équipement synchrone	G.813	5•10^{-8} Dérive sur 24 h. 2•10^{-7}

Figure 13.10 Les références normatives.

Dans les réseaux SDH, l'octet **SSM** (*StatuS Message byte*, message d'état de la synchronisation) permet à chaque instant d'être informé de l'état de la source de synchronisation. Enfin, remarquons que, pour garantir son indépendance, chaque opérateur dispose de sa propre horloge de référence. Par conséquent, si les réseaux d'opérateur sont des réseaux synchrones (SDH), le réseau qui résulte de leur interconnexion est un réseau du type plésiochrone.

13.2.3 La hiérarchie plésiochrone (PDH)

Généralités

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 téléphoniques de 64 kbit/s. Ces regroupements sont différents en Europe, au Japon et en Amérique du nord, ce qui conduit à la définition de différentes hiérarchies plésiochrones illustrées par la figure 13.11.

3. Lorsque l'on fournit une énergie suffisante, un électron passe d'un niveau d'énergie à un autre. C'est sur ce principe que reposent les horloges atomiques, il consiste à irradier des atomes de césium 133 à l'aide d'une source rayonnante afin de provoquer une transition de niveau. Pour maintenir ces transitions, la source de fréquence est asservie par les transitions elles-mêmes, on obtient ainsi un générateur de référence horaire très stable : 9 162 631 770 Hz avec une stabilité de 10^{-14} soit d'une seconde de dérive pour 3 millions d'années ! Rappelons que, depuis 1967, la seconde a été définie comme correspondant à 9 162 631 770 périodes de radiation correspondant à la transition entre deux niveaux de l'atome de césium 133.

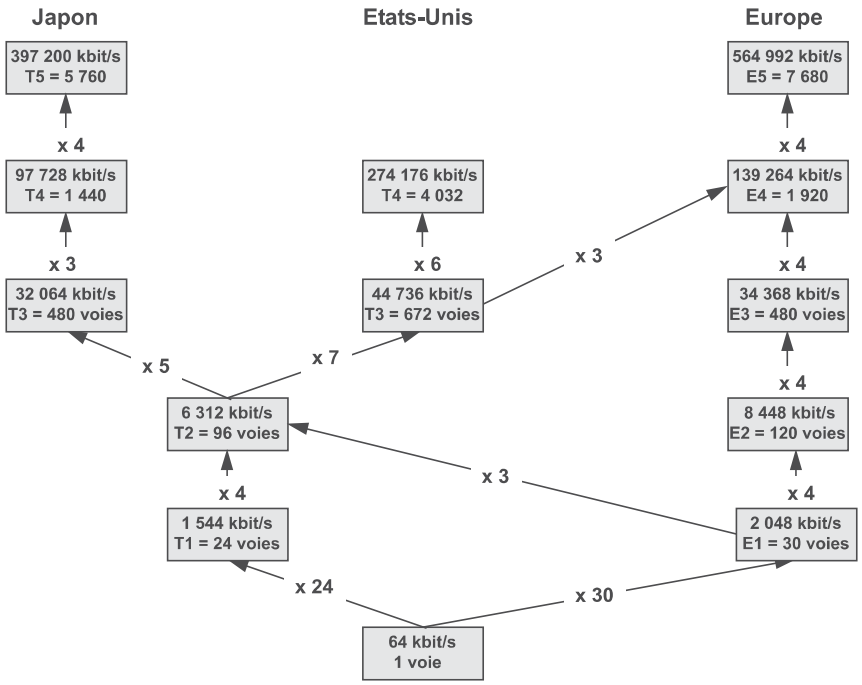

Figure 13.11 Les différents regroupements en hiérarchie PDH.

Chaque intervalle de temps ou IT peut transporter un échantillon de voix ou toute autre information numérique. La concaténation de plusieurs voies permet une granularité des débits modulo 64 kbit/s. Les surdébits 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.

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 13.12.

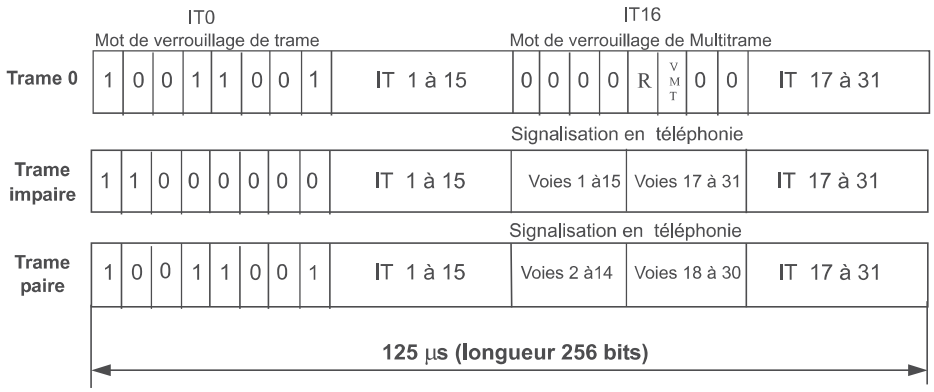

Figure 13.12 L'organisation de la trame G.704 ou G.732 (téléphonie).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

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 13.12). 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.

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[4] (trame G.733, aussi notée DS1 à DS12), représentée figure 13.13, 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.

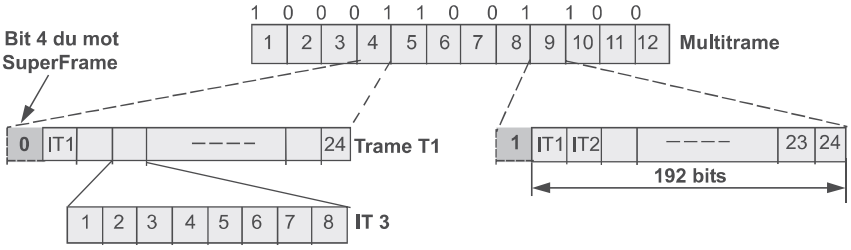

Figure 13.13 L'organisation de la multitrame T1.

La signalisation téléphonique de chacune des voies est réalisée par vol, toutes les six 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 l'IT de signalisation de la trame E1, en transmission de données, il pénalise fortement le système, la bande utile n'étant plus que de 56 kbit/s par IT (7 bits, toutes les 125 μs).

13.2.4 La hiérarchie synchrone (SDH)

Généralités

La hiérarchie numérique synchrone conserve une structure de multiplexage, elle améliore les fonctions de maintenance et d'exploitation du réseau, elle simplifie la mise en œuvre et l'interconnexion des réseaux.

4. T1 désigne le canal de transmission, DSx le format des données.

Outre l'utilisation de surdébits (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 13.14 illustre l'extraction d'un conduit à 2 Mbit/s d'un lien à 140 Mbit/s.

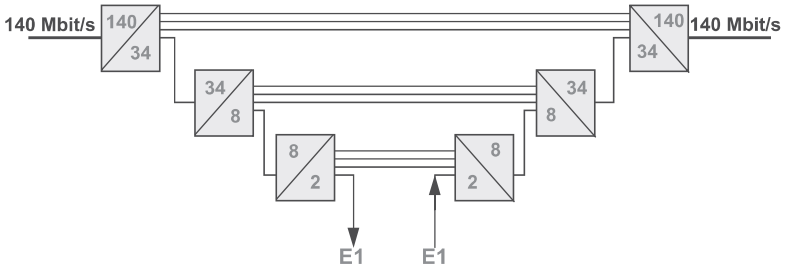

Figure 13.14 La constitution d'une liaison à 2 Mbit/s entre A et B en PDH.

La hiérarchie synchrone se distingue essentiellement de la hiérarchie plésiochrone par la distribution d'horloge à tous les niveaux du réseau réduisant ainsi les écarts d'horloge. Les données sont encapsulées 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 13.15). Ce dernier point constitue l'un des principaux avantages de la hiérarchie SDH par rapport à la hiérarchie PDH.

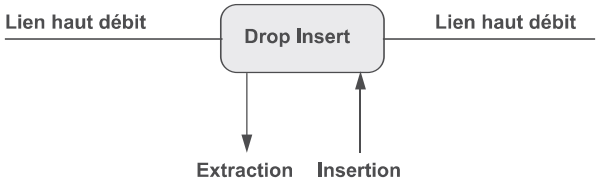

Figure 13.15 L'insertion et l'extraction d'un niveau inférieur.

On distingue deux types de hiérarchie synchrone : la hiérarchie SDH en Europe et la hiérarchie **SONET**[5] (*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*). La figure 13.16 donne la correspondance entre les deux hiérarchies.

La trame de base SDH (figure 13.17) comporte 2 430 octets émis avec une période de récurrence de 125 μs 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**,

5. C'est la hiérarchie SONET qui, issue des travaux de Bellcore en 1985 (BELL COmmunication REsearch), est à l'origine de la hiérarchie SDH.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

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 13.16 Correspondance entre SONET et SDH.

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*.

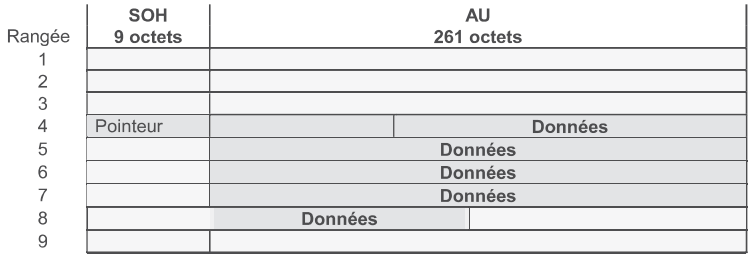

Figure 13.17 La structure simplifiée de la trame SDH.

Les équipements SDH

La hiérarchie synchrone met en œuvre trois types d'équipements (figure 13.18) :

- 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 ↔ W) tout en autorisant l'extraction et/ou l'insertion de sous-débit.
- 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.

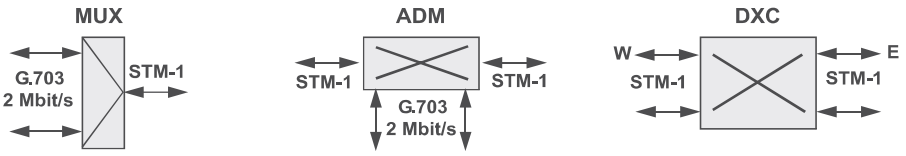

Figure 13.18 Les équipements SDH.

Le multiplexage des différents affluents d'ordre *N* vers un affluent d'ordre *N+1* est réalisé par entrelacement d'octets (figure 13.19).

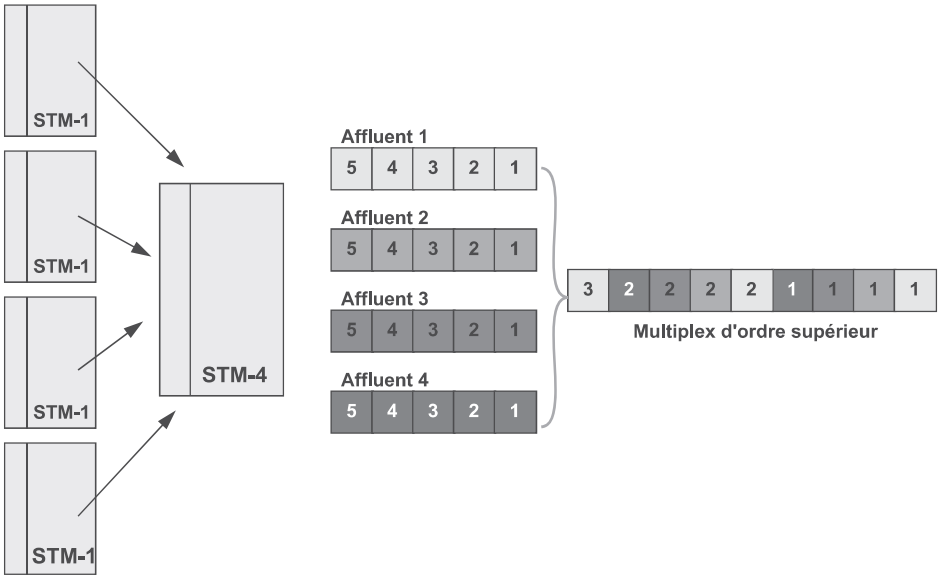

Figure 13.19 Principe du multiplexage d'octets.

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 débuter son insertion/extraction dans le multiplex d'ordre supérieur/inférieur.

La topologie d'un réseau SDH

La technologie SDH peut être mise en œuvre sur toutes les formes de topologie : point à point, arborescente, bus, anneau et maillée[6]. Généralement, les réseaux dorsaux utilisent une topologie maillée alors que les réseaux de desserte (métropolitain) sont constitués d'une hiérarchie d'anneaux (figure 13.20).

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 Swiching*), est basé sur l'utilisation d'informations de supervision contenues directement dans l'en-tête SDH (surdébit de section, SOH).

13.2.5 La transmission optique

Si la hiérarchie synchrone se préoccupe de la structuration des données, la transmission physique est aujourd'hui optique. L'apparition des systèmes WDM/DWDM *(Wavelength Division Multiplexing, Dense WDM*) illustré figure 13.21 permet sur une seule fibre de disposer jusqu'à 128 canaux de communication. Les amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) compensent les pertes d'insertion dues aux opérations de multiplexage et de démultiplexage.

6. La tendance actuelle est plutôt au développement de réseau « marguerite » : ensemble d'anneaux autour d'un cœur de réseau, lui-même une boucle (boucle nationale, boucle régionale, boucle métropolitaine).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

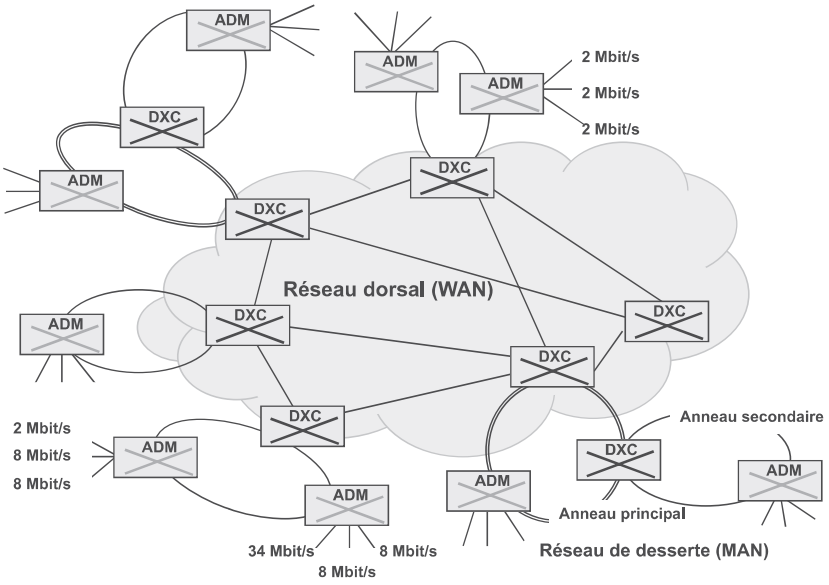

Figure 13.20 Principe d'un réseau SDH.

Figure 13.21 Principe d'une liaison DWDM.

13.3 LE PLAN DE SERVICE

13.3.1 Généralités

Le plan de service (figure 13.22) correspond au réseau de transport de données. L'interconnexion des installations locales de l'usager est réalisée par le plan service.

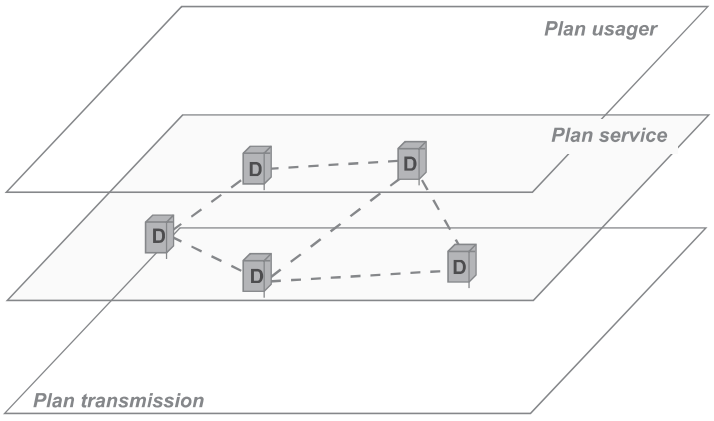

Figure 13.22 Le plan de service.

La figure 13.23 représente le réseau de transport tel que le voit l'usager.

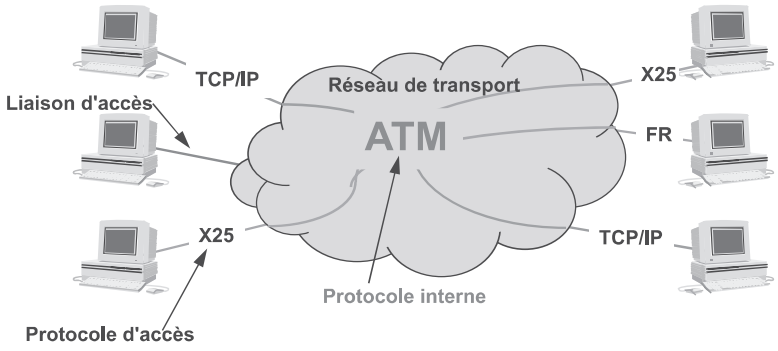

Figure 13.23 Les protocoles d'accès et protocole interne.

Au cours des années 1970, 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. À l'origine, défini comme protocole d'accès aux réseaux de transport, X.25 a très vite évolué vers un protocole de cœur de réseau. Le besoin croissant de bande passante a rapidement conduit les opérateurs à rechercher des protocoles internes plus efficaces : d'abord le relais de trames (**FR**, *Frame Relay*), puis l'**ATM** (*Asynchronous Transfer Mode*).

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 13.24). 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).

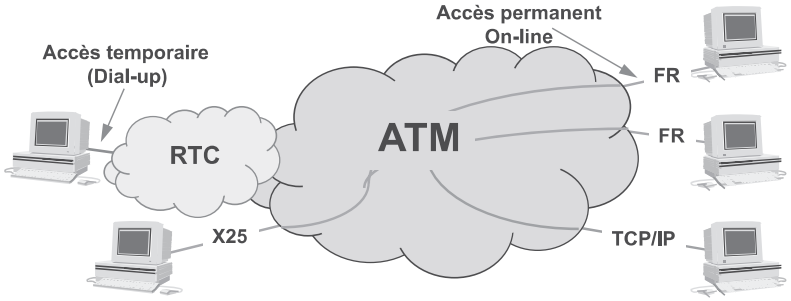

Figure 13.24 Les différents modes d'accès au réseau de transport.

13.3.2 Introduction aux protocoles réseaux

Le protocole X.25

Conçu par les PTT français et britanniques, TCTS (*Trans Canada Telephon System*) et Telnet (États-Unis), le protocole X.25 a été le premier protocole utilisé dans les réseaux publics de

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

données. C'est en décembre 1978 que Transpac (*Transmission by packet*, filiale de France Télécom) a ouvert le premier réseau mondial public de transmission en mode paquet 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[7] couvre les trois premières couches du modèle OSI[8] (figure 13.25) :

– 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 œuvre un sous-ensemble d'HDLC appelé LAP-B (*High Level Data Link Control*, *Link Access Protocol Balenced*).
– 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**.

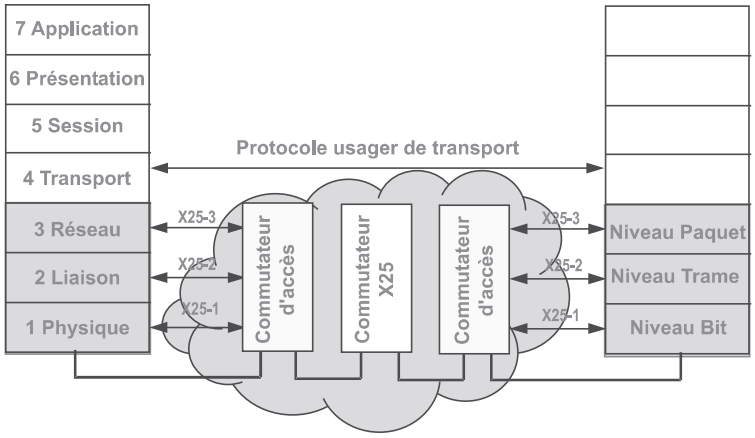

Figure 13.25 L'architecture du protocole X.25.

Dans le protocole X.25, la signalisation est du type dans la bande, ce qui signifie que les données et les informations de signalisation sont transportées par des unités de données similaires. Indépendamment de la pauvreté d'un tel système de signalisation, l'établissement de la route et la commutation sont réalisées au même niveau et traitées par une même instance de programme, ceci a pour conséquence immédiate non seulement de multiplier les opérations d'encapsulation et de décapsulation mais surtout de pénaliser les performances.

La décentralisation des traitements vers une architecture largement distribuée de type client/serveur a modifié l'amplitude et la nature des trafics sur les liens d'interconnexion. L'accroissement des débits nécessaires et la sporadicité des échanges caractérisent essentiellement cette évolution, rendant obsolète les offres de débit figées telles que celles d'X.25.

7. Le protocole X.25 est étudié en détail au chapitre suivant.
8. Le modèle OSI a été décrit au chapitre 7.

Le développement d'applications multimédias (données, son, vidéo) a, non seulement, engendré un besoin de débit plus important, mais a introduit également des contraintes temporelles strictes dans les échanges (trafic isochrone). X.25 ne peut répondre à cette demande.

Introduction à l'évolution des protocoles réseaux

L'évolution des protocoles réseaux s'est réalisée selon deux approches (figure 13.26) :

- Le relais de trames ou *Frame Relay* qui correspond à un allégement du protocole HDLC version LAP-D. Ce protocole répond aux besoins de haut débit ; ne traitant pas les flux isochrones à l'origine, il a été perçu comme un protocole de transition entre X.25 et ATM ;
- Le relais de cellules ou *Cell Relay*, plus connu sous le nom d'**ATM** (*Asynchronous Transfer Mode*) qui utilise une technique de commutation rapide de cellules de taille fixe. ATM met en œuvre des mécanismes spécifiques pour assurer les transferts isochrones (émulation de circuits pour la voix et la vidéo).

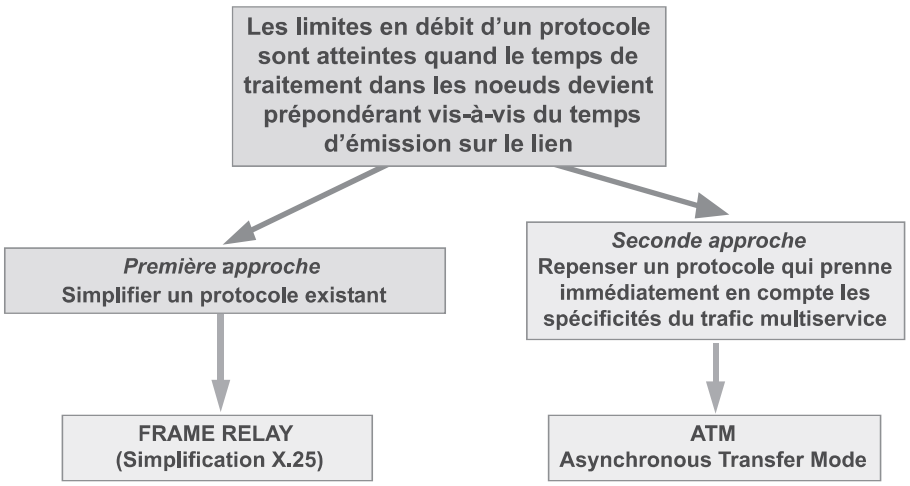

Figure 13.26 Les différentes approches des nouveaux protocoles.

C'est dans le cadre de l'évolution du RNIS (**RNIS-LB**, RNIS large bande ou **B-ISDN**, *Broadband-ISDN*) qu'ont été développés le Frame Relay et l'ATM.

L'augmentation du débit réel de ces protocoles ne peut résulter que de l'allégement des traitements intermédiaires, ce qui a conduit à :

- reporter sur les organes d'extrémité (les calculateurs) les tâches de détection et de reprise sur erreur ;
- diminuer les opérations de couches en effectuant les opérations d'acheminement le plus bas possible, sans avoir à remonter au niveau 3 ;
- formuler des hypothèses optimistes sur le comportement du réseau en n'effectuant pas de contrôle de flux entre les nœuds ;
- supprimer les acquittements intermédiaires, ceux-ci n'étant réalisés que par les organes d'extrémité (acquittement de bout en bout) ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

– simplifier le traitement dans les nœuds en n'utilisant qu'un seul type de données et en mettant en œuvre une signalisation par **canal sémaphore** pour l'établissement des circuits et la gestion du réseau.

C'est notamment, l'introduction de la fibre optique dans les réseaux qui, en fiabilisant la transmission, a autorisé cette simplification des protocoles. La figure 13.27 représente l'architecture générale de ces nouveaux protocoles :

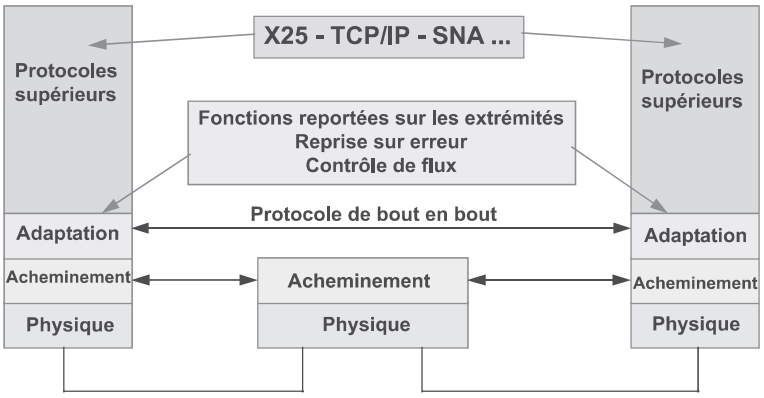

Figure 13.27 L'architecture générale des réseaux haut débit.

Dans ce type d'architecture, la couche 2 est scindée en deux sous-couches : un noyau assurant les fonctions élémentaires d'acheminement, de détection d'erreur et de signalisation de la congestion, et une couche d'adaptation entre les protocoles supérieurs et le noyau. Cette dernière, facultative, n'est présente que sur les organes d'extrémité. L'ensemble assure la transparence aux protocoles supérieurs.

Introduction au Frame Relay

La première approche d'allégement des tâches X.25 a concerné l'acheminement. Le champ Adresse de la trame LAP-B étant inutilisé, il était possible d'y inscrire l'information d'indication du numéro de voie logique et de réaliser ainsi la commutation au niveau 2 (*Frame switching* ou commutation de trames). Ce principe est illustré figure 13.28.

Par la suite, toutes les fonctions non liées directement à l'acheminement furent abandonnées pour donner naissance au **relais de trames** (*Frame Relay*) ou encore **LAP-F**. Initialement prévue pour une utilisation sur le RNIS (Canal D ou sur un ou plusieurs canaux B), la technologie Frame Relay[9] a rapidement évolué, sous l'égide du Frame Relay Forum[10], vers un service de liaisons virtuelles permanentes, puis commutées utilisables sur tout support numérique, hors RNIS.

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, protocole D du RNIS). Elle établit un service de liaison virtuelle entre les deux extrémités, qui peut

9. Le protocole *Frame Relay* est étudié en détail au chapitre suivant.

10. Afin d'harmoniser les solutions, de combler les vides des normes et de proposer rapidement des solutions techniques cohérentes, les constructeurs se regroupent autour d'une technologie pour édicter leurs propres règles : ce sont les forums constructeurs.

être permanent (PVC, *Permanent Virtual Circuit*) ou établi à la demande (SVC, *Switched Virtual Circuit*). Compte tenu de la complexité d'établissement d'un SVC, les opérateurs n'offrent qu'un service de circuits virtuels permanents.

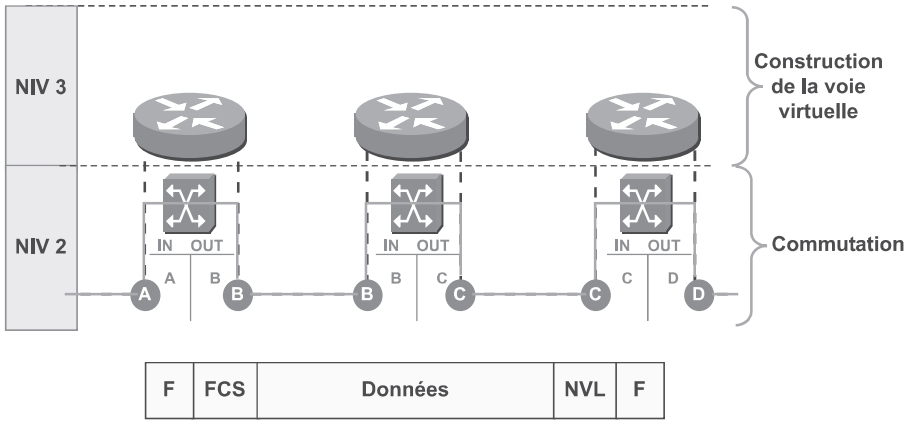

Figure 13.28 Première approche du Frame Relay.

Le relais de trames couvre les couches 1 et 2 du modèle OSI, mais n'est pas conforme à ce dernier. La couche physique émet un train de bits sur le support en assurant la transparence binaire (technique dite du *Bit stuffing* ou de transparence binaire)

La couche 2 est subdivisée en deux sous-couches : le noyau (*Core*) et une sous-couche (**EOP**, *Element of Procedure*) complémentaire mais facultative. Non normalisées, ces fonctionnalités sont laissées à la discrétion de l'utilisateur. Cette sous-couche 2 supérieure peut, par exemple, être HDLC LAP-B. La répartition des fonctions essentielles est schématisée par la figure 13.29.

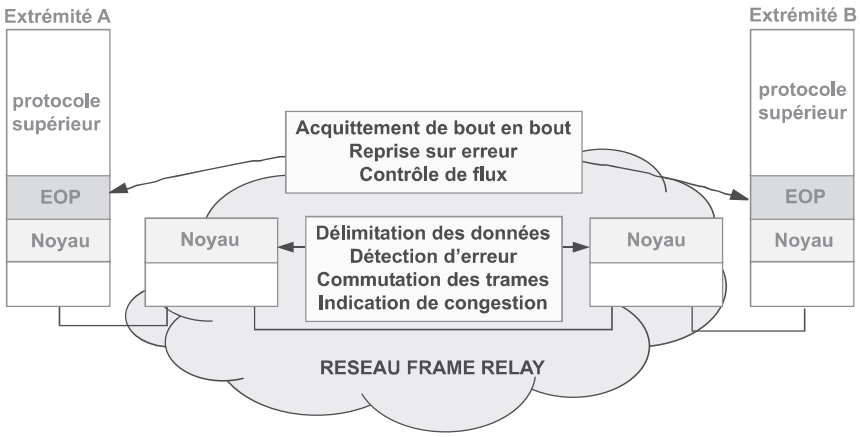

Figure 13.29 L'architecture du relais de trames.

Introduction à l'ATM (Asynchronous Transfer Mode)

Le relais de trames n'est qu'une évolution d'HDLC (LAP-D). Peu adapté, en natif, au transfert des flux isochrones, il n'est parfois perçu que comme une solution temporaire au besoin de haut débit. Ses limitations sont essentiellement dues au traitement d'unités de données de taille variable.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

Pour pallier cet inconvénient, la recommandation FR11 (Frame Relay Forum 11) introduit, pour le traitement de la voix, la notion de trames de longueur fixe.

C'est l'approche initiale d'ATM[11] qui, en traitant des unités de données de taille réduite et fixe (cellules), a considérablement réduit les temps de traitements. La commutation est alors directement réalisée par des systèmes matériels (*hardware*) et non plus logiciels, ce qui autorise des débits de plusieurs centaines de mégabits par seconde.

C'est sur ces bases que le CNET (Centre nationale d'étude et de télécommunication) a décrit, en 1982, une technique de multiplexage asynchrone (**ATD**, *Asynchronous Time Division*) qui allait donner naissance à l'ATM. L'ATM supporte des liaisons point à point, ou point à multipoint, il comporte trois couches (figure 13.30) dont les fonctions essentielles sont :

– assurer l'adaptation des cellules au système de transport physique utilisé (couche physique),
– effectuer la commutation et le multiplexage des cellules (couche ATM à proprement parler),
– adapter les unités de données (segmentation et réassemblage) des protocoles supérieurs à la couche ATM (couche **AAL**, *ATM Adaptation Layer*) et mettre en place des mécanismes spécifiques à chaque type de données transportées.

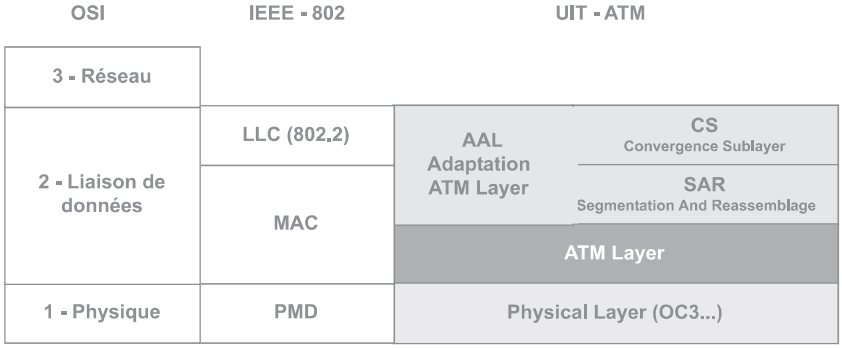

Figure 13.30 L'architecture ATM.

L'ATM est une technologie en mode connecté, les données ne sont acheminées dans le réseau qu'après l'établissement d'une voie virtuelle (**VCC**, *Virtual Channel Connection*). Le circuit établi peut-être :

– bidirectionnel en mode point à point (*unicast*),
– unidirectionnel en mode point à multipoint (*multicast*).

Technologie orientée connexion, l'ATM peut, toutefois, émuler un mode de fonctionnement non connecté.

Conclusion

Autorisant un partage optimal de la bande passante, l'ATM est aujourd'hui le protocole de cœur de réseau utilisé par la majorité des opérateurs. Outre l'aspect performance, l'ATM permet de garantir aux utilisateurs une certaine qualité de service de bout en bout.

11. Le protocole ATM est étudié en détail au chapitre suivant.

L'ATM n'est pas un protocole de bout en bout comme l'est TCP/IP, ce n'est qu'un protocole de transport. Les données utilisateurs doivent donc être encapsulées, ceci conduit à des empilements protocolaires fortement pénalisants. Aussi, la tendance actuelle consiste à appuyer les protocoles utilisateurs (TCP/IP) sur la couche transmission (**POS**, *Packet Over SDH/Sonet*) voire directement sur la couche optique. Cependant, afin d'apporter au monde IP les avantages de la commutation, une couche supplémentaire a été introduite afin de labéliser les datagrammes IP et de substituer au routage IP la commutation. MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) associé à PPP permet le transport des flux IP sur SDH (figure 13.31), voire directement sur un canal optique (**WDM**, *Wavelength Division Multiplexing* ou multiplexage de longueur d'onde).

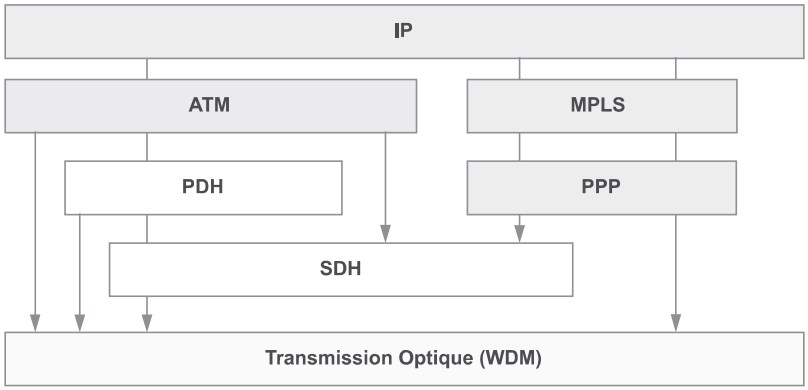

Figure 13.31 L'évolution de l'architecture protocolaire des réseaux.

13.3.3 Les réseaux d'opérateurs

Généralités

Les réseaux d'opérateurs assurent deux fonctions essentielles, la collecte des flux des différentes sources par un ensemble de liens formant le réseau d'accès, et l'acheminement de ce trafic par leurs réseaux dits de transit. Certains opérateurs n'assurent que l'une des deux fonctions, on distingue alors les opérateurs de boucle locale et les opérateurs de transit. On appelle point de présence (**PoP**, *Point of Presence*) l'interface d'interconnexion entre le réseau d'accès et le réseau de transit (figure 13.32).

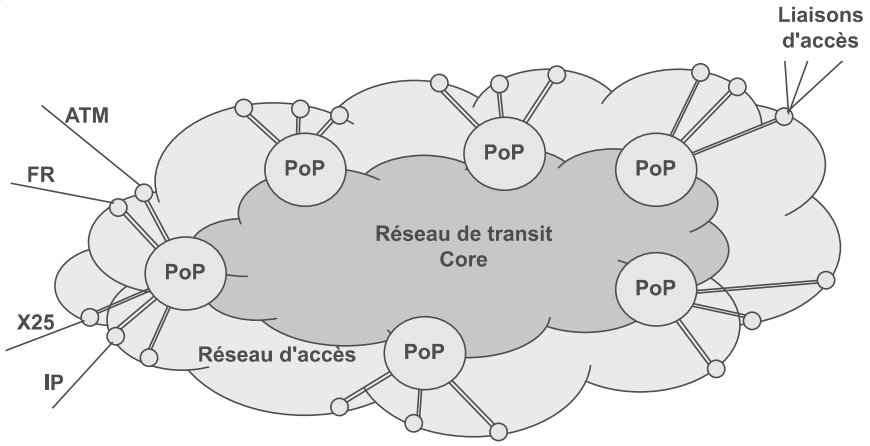

Figure 13.32 L'architecture du plan de service.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

La conception d'un réseau d'opérateur doit répondre à trois critères :

– performance pour le cœur de réseau (réseau de transit) ;
– flexibilité à la périphérie (PoP) ;
– enfin, capacité d'irrigation pour le réseau de desserte (réseau d'accès).

Les réseaux IP

La plupart des réseaux d'opérateurs mettent en œuvre le protocole ATM, alors que la majorité des utilisateurs utilisent le protocole TCP/IP. On désigne sous le nom de réseau IP, l'infrastructure de l'opérateur destinée à acheminer le trafic IP. Le trafic IP peut être tout simplement encapsulé dans l'ATM sans apport de qualité de service (figure 13.33).

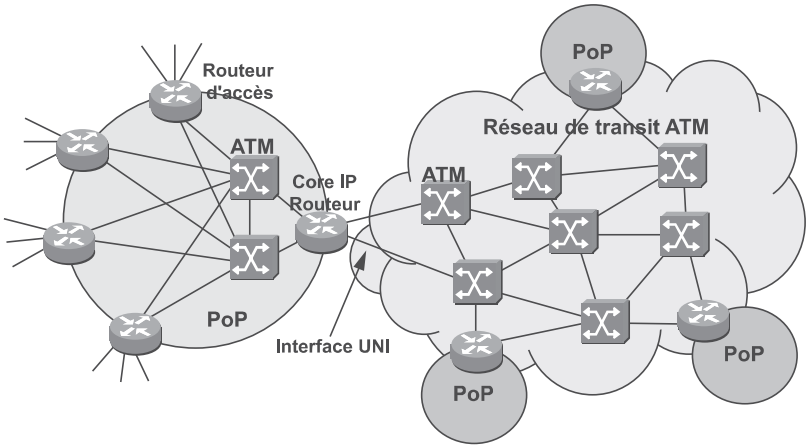

Figure 13.33 Les réseaux IP/ATM.

Cependant l'utilisation du protocole MPLS[12] (*MultiProtocol Label Switching*) permet d'assurer un trafic différencié (DiffServ) par distribution des labels et mappage de ceux-ci sur une voie ATM (figure 13.34).

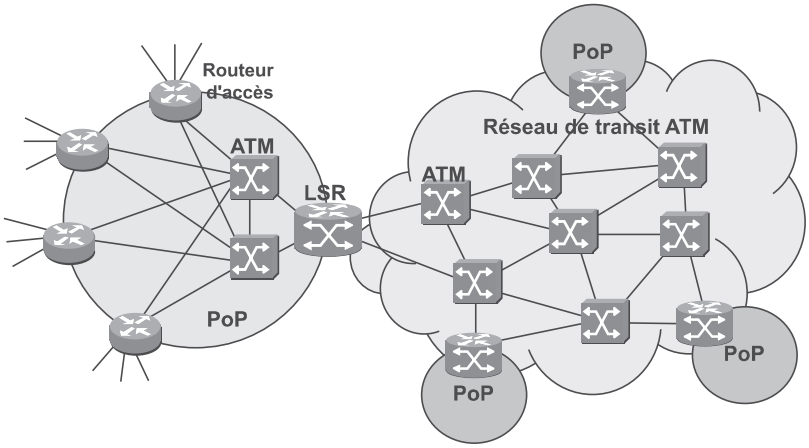

Figure 13.34 Les réseaux IP/MPLS sur ATM.

12. Le protocole MPLS est étudié en détail au chapitre 15.

Les routeurs d'interface (*Core IP Router*) sont remplacés par des commutateurs/routeurs qui attribuent un label MPLS aux datagrammes IP (**LSR**, *Label Switching Router*). Remarquons que chaque routeur d'accès et LSR disposent, pour des raisons de sécurité, d'un double attachement aux commutateurs ATM (voir § 13.4.3).

13.4 L'ACCÈS AUX RÉSEAUX, LA BOUCLE LOCALE

13.4.1 Définition

La boucle locale correspond à l'ensemble des moyens mis en œuvre 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.

13.4.2 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'usager pour raccorder ses propres sites informatiques et réaliser ainsi un réseau privé (opérateur de liaisons louées). La figure 13.35 illustre cette approche.

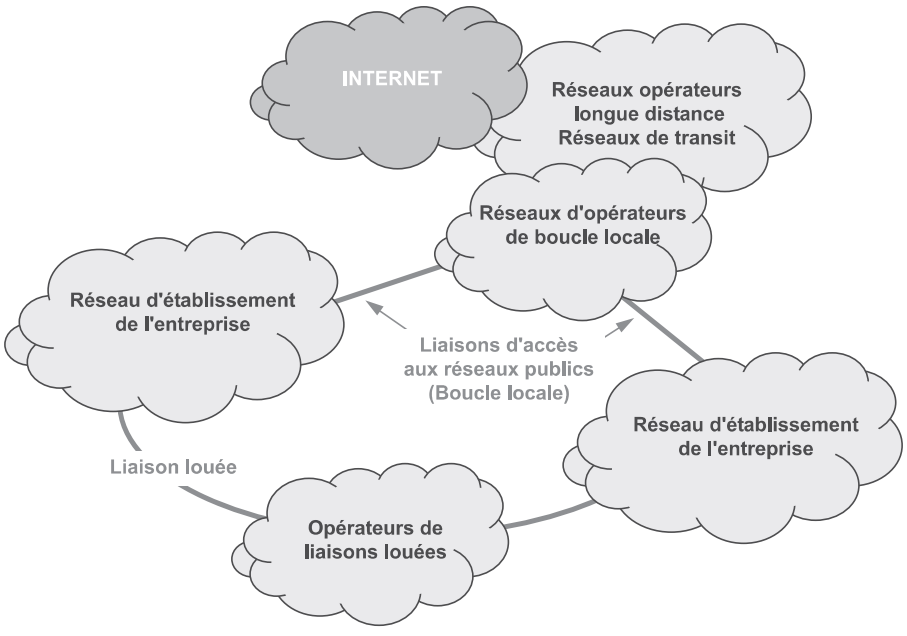

Figure 13.35 Principe du raccordement des usagers.

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. La mise en concurrence des télécommunications a donc posé le problème du partage de cette ressource.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit