

## Chapitre 3 Les Réseaux de transport

### I. Le transport de la synchronisation dans les infrastructures de transport télécom

(Doc Synchronisation page 3 et 4)

### II. Hiérarchie numérique plésiochrone

La **hiérarchie numérique plésiochrone** ou PDH (en anglais *Plesiochronous Digital Hierarchy*) est une technologie utilisée dans les réseaux de télécommunications afin de véhiculer les voies téléphoniques numérisées. Le terme « plésiochrone » vient du grec *plesio* (proche) et *chronos* (temps) et reflète le fait que les réseaux PDH utilisent des éléments identiques mais non parfaitement synchronisés : ils ont un même débit nominal pour toutes les artères du même type mais ce débit diffère légèrement en fonction de l'horloge de traitement local.

Les versions européennes et américaines du système diffèrent légèrement mais reposent sur le même principe, nous décrivons ici le système européen.

Le transfert de données est basé sur un flux à 2 048 kbit/s. Pour la transmission de la voix, ce flux est séparé en 30 canaux de 64 kbit/s et 2 canaux de 64 kbit/s utilisés pour la signalisation et la synchronisation. On peut également utiliser l'intégralité du flux pour de la transmission de donnée dont le protocole s'occupera du contrôle.

Le débit exact des données dans le flux de 2 Mbit/s est contrôlé par une horloge dans l'équipement générant les données. Le débit exact varie légèrement autour de 2 048 kbit/s ( $\pm 50$  ppm).

Afin d'amener plusieurs flux de 2 Mbit/s d'un point à un autre, ils sont combinés par multiplexage en groupes de quatre. Cette opération consiste à prendre 1 bit du flux #1 suivi d'un bit du #2, puis le #3 et enfin le #4. L'équipement émetteur ajoute également des informations permettant de décoder le flux multiplexé.

Chaque flux de 2 Mbit/s n'étant pas nécessairement au même débit, des compensations doivent être faites. L'émetteur combine les quatre flux en assumant qu'ils utilisent le débit maximum autorisé. Occasionnellement le multiplexeur essaiera donc d'obtenir un bit qui n'est pas encore arrivé ! Dans ce cas, il signale au récepteur qu'un bit est manquant ce qui permet la reconstruction des flux à la réception.

La combinaison du multiplexage décrit permet un débit de 8 Mbit/s. Des techniques similaires permettent d'agréger quatre de ces flux pour former des conduits de 34 Mbit/s puis 140 Mbit/s et enfin 565 Mbit/s.

Ces débits sont nommés  $E_i$  avec :

- $E_1$  correspondant à 2 048 kbit/s
- $E_2$  correspondant à 8 Mbit/s
- $E_3$  correspondant à 34 Mbit/s
- $E_4$  correspondant à 140 Mbit/s (le plus haut débit normalisé)
- 560 Mbit/s n'ayant jamais été normalisé, bien que mis en œuvre sur TAT-9, TAT-10, liaisons sous marines transatlantiques 1992)

L'utilisation du PDH se limite le plus souvent à 140 Mbit/s après quoi on lui préfère la SDH.

### III. Hiérarchie numérique synchrone

La **hiérarchie numérique synchrone** ou **SDH** (en anglais *Synchronous Digital Hierarchy*) est un ensemble de protocoles pour la transmission de données numériques à haut débit. Il relève du niveau 1 du modèle en couches de l'OSI et correspond à SONET aux États-Unis. En pratique, ces protocoles sont utilisés par les opérateurs de télécommunication pour leur réseau, mais la SDH fait aussi l'objet de services vendus aux entreprises, comme l'offre SMHD de France Télécom, une offre de boucle(s) privative(s) basée sur la technologie SDH. C'est un réseau de distribution d'horloge qui permet la délivrance de bits en synchronisme de l'horloge de référence.

L'intérêt de la SDH est la richesse des fonctions de gestion, de surveillance, d'alarmes et d'autocicatrisation.

Par ailleurs, la SDH constitue la troisième génération de la hiérarchie de multiplexage des infrastructures des opérateurs où elle succède à la PDH ( E1 (2 Mbit/s), E2 (8 Mbit/s), E3 (34 Mbit/s), etc. en Europe, T1 (1,5 Mbit/s), T2 (6 Mbit/s), T3 (45 Mbit/s), etc. aux États-Unis). Ses débits sont appelés STM-i avec le STM-1 égal à 155,52 Mbit/s. STM signifie Synchronous Transport Module. Le STM-4 correspond à un débit de 622 Mbit/s, le STM-16 correspond à un débit de 2,5 Gbit/s et le STM-64 correspond à un débit de 10 Gbit/s.

- La SDH est concurrencée par Ethernet. En effet, SDH est une technique originellement conçue pour gérer les communications en mode circuit, typiquement les communications téléphoniques. Or, depuis les années 2000, le volume de données de type paquet a supplanté en quantité celui des données de type téléphonique, laissant SDH un peu inadapté aux nouveaux services qu'on lui demande aujourd'hui.
- Une nouvelle version de SDH, SDH NG (pour Next Generation), basée sur GFP (**en**), a vu le jour pour faire face à cette situation sans qu'elle soit pour le moment encore largement déployée.

#### Les principaux avantages de la SDH

##### **Simplification du réseau**

La simplification des techniques de multiplexage / démultiplexage permet l'utilisation d'un nombre illimité d'équipements.

##### **Haute flexibilité**

Possibilité d'accéder aux affluents bas débits sans besoin de décomposer tout le signal haut débit.

##### **Gestion « In Band »**

Canaux intégrés de gestion du réseau, permettant les fonctionnalités d'exploitation, d'administration et de maintenance.

##### **Intégration de PDH**

Possibilité de transporter des signaux existants dans PDH. Ceci permet d'intégrer les équipements SDH dans les réseaux existant, et permet l'introduction d'une large gamme de services.

##### **"Mid fiber meet"**

La norme définit une interface optique qui permet l'interconnexion entre équipements de constructeurs différents.

##### **Capacité de survie**

Une vaste utilisation de boucles optiques auto-cicatrisantes et de basculements automatiques dans les équipements, permet aux opérateurs d'obtenir un taux élevé de disponibilité de service.

#### **Evolutivité**

Facilité d'évolution vers les niveaux de multiplexage supérieurs, l'extension du réseau et les nouveaux services.

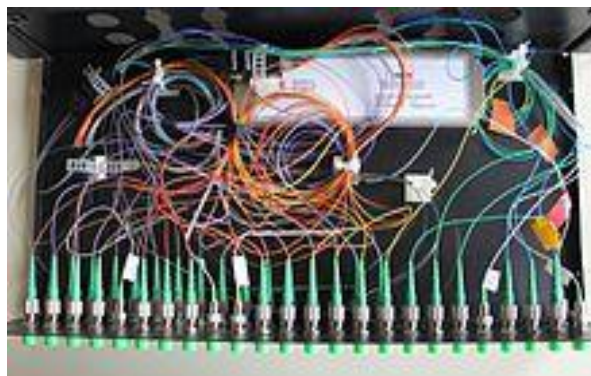
#### **IV. SONET (ou *Synchronous Optical NETWORK* en anglais)**

Est un modèle de norme de transmission optique. C'est un protocole de la couche 1 du modèle OSI. Initialement, SONET été normalisé pour des transmissions téléphoniques. La technique générale de transport de SONET/SDH est PoS (Packet over SONET). SONET/SDH ont été modifiés à partir de 2002 pour s'adapter aux protocoles IP, ATM et Ethernet.

#### **V. Multiplexage en longueur d'onde**

Le **multiplexage en longueur d'onde**, souvent appelé **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing* en anglais), est une technique utilisée en communication optique qui permet d'augmenter le débit sur une fibre optique en faisant circuler plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes sur une seule fibre, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (Mux) et en les séparant à la sortie au moyen d'un démultiplexeur (deMux). C'est une invention française (brevet n° 74/01.800 déposé le 18 janvier 1974).

#### **Principe**



Multiplexeur WDM pour les communications DWDM

Pour pouvoir multiplexer plusieurs sources optiques, il faut préalablement modifier leur longueur d'onde en utilisant des matériels spécifiques : transceivers ou transpondeurs.

Chaque flux d'information est codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase, comme pour une transmission sur fibre optique standard.

Les équipements de démultiplexage sont généralement des équipements passifs, type réseaux de diffraction. Ils agissent comme des filtres en sélectionnant le signal dans une zone de longueur d'onde donnée.

Le multiplexage en longueur d'onde sur une fibre utilise mieux la bande passante de la fibre, c'est une solution économique qui permet de maximiser la capacité de celle-ci.

Les canaux peuvent être identifiés, soit par la fréquence de la porteuse optique, soit par la longueur d'onde, les deux étant reliées par la relation simple avec la célérité de la lumière dans le vide.

## Types de WDM



Serie of SFP+ transceivers for 10 Gbps WDM communications

Lorsque l'espacement entre les longueurs d'onde est de 20 nm, on parle de *Coarse WDM* (**CWDM**). L'avantage du CWDM est son coût. En effet, grâce à l'important espacement laissé à chaque canal, on n'est pas obligé de réguler en température le laser d'émission. Par contre, on est limité à 16 canaux, pas amplifiés (moins cher) donc sur 150 km au maximum. En CWDM, 8 longueurs d'onde sont utilisables avec des optiques 10 Gbit/s.

Pour un espacement plus faible (donc plus de longueurs d'onde simultanément en propagation), on parle de WDM, voire *Dense WDM* (**DWDM**, plus de 32 longueurs d'onde) et même *Ultra Dense WDM* (**UDWDM**). Les systèmes DWDM commerciaux espacent les longueurs d'onde d'environ 0,8 nm (100 GHz), 0,4 nm (50 GHz) voire 0,1 nm (12,5 GHz). Il est ainsi possible de combiner 160 longueurs d'onde optiques et plus.

Malgré des tentatives audacieuses (exploitant les solitons par exemple), cette technologie reste la seule déployée sur les réseaux télécoms longue distance (*long-haul*), et même métropolitains.

### Bandes de fréquences normalisées

L'UIT a normalisé au niveau mondial les bandes de fréquences (et donc les longueurs d'ondes) des fibres optiques selon le plan suivant :

- bande U (Ultra) : 178,980 à 184,487 THz (de 1 675 à 1 625 nm) ;
- bande L (Longue) : 184,487 à 191,560 THz ( de 1 625 à 1 565 nm) ;
- bande C (Conventionnelle) : 191,560 à 195,942 THz ( de 1 565 à 1 530 nm) ;
- bande S (*Short*) : 195,942 à 205,337 THz ( de 1 530 à 1 460 nm) ;
- bande E (Étendue) : 205,337 à 220,435 THz ( de 1 460 à 1 360 nm) ;
- bande O (Originale) : 220,435 à 237,930 THz ( de 1 360 à 1 260 nm).

La bande de fréquence la plus utilisée est la bande C (1 530 - 1 565 nm). C'est le spectre amplifié par les amplificateurs EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*). L'ITU a spécifié des numéros pour les fréquences. 192,1 THz est la fréquence 1, 192,2 THz est la fréquence 2, etc. C'est aussi la bande de fréquence sur laquelle l'atténuation est minimale.

Poursuivons le raisonnement : La bande C équivaut en Hz à (196 THz - 192 THz), ce qui offre 4 THz de bande passante. Sur la courbe caractéristique de la silice, l'atténuation dans la bande passante (1 530 nm - 1 565 nm) est de 0,2 dB/km.

Il existe un autre intervalle où l'atténuation reste faible et intéressante (1 290 nm - 1 330 nm) ; dans cet intervalle l'affaiblissement est de 0,3 dB/km. On utilisait moins, cette bande passante, vu qu'elle offre des portées plus faibles, sauf pour les réseaux locaux (Ethernet 10GBASE-

LX4), et les réseaux FTTH d'accès à Internet (notamment les réseaux GPON et TWDM-PON).

Entre 1 330 nm et 1 530 nm, l'atténuation était trop importante avec les fibres classiques. Mais avec les nouvelles générations de fibres optiques, cette atténuation élevée n'existe plus entre 1 330 nm et 1 530 nm, elle est assez proche de 0,2 dB/km. La bande passante des fibres optiques nouvelle génération atteint ainsi plus de 35 THz (1 290 nm - 1 565 nm).

Avec les besoins croissants de bande passante, on exploite maintenant la bande L et les amplificateurs à diffusion Raman.

## Domaines d'application classiques

On distingue souvent deux segments : *long haul* et *metro*.

### Segment WDM longue portée (*Long Haul*)

- Technologie WDM employée : DWDM
- Applications : grandes artères sur des longues distances (> 100 km), câbles sous-marins internationaux
- Topologie : point à point, avec un nœud de régénération ou un multiplexeur optique d'insertion-extraction tous les 80 km environ
- Interfaces : débits les plus élevés possibles (2,5, 10 ou 40 Gbit/s)

### Segment WDM métropolitain (*Metro*)

- Technologies WDM employées : CWDM et DWDM
- Applications : liaisons entre les établissements d'une entreprise, boucles optiques au niveau d'une agglomération, distance typiquement inférieure à 100 km
- Topologie : point à point, boucle ou maillage. Généralement sans nœud de régénération ou d'amplification
- Interfaces : diverses (interfaces numériques SONET/SDH haut et bas débit, gigabit Ethernet, fibre Channel, ...)

## Liaisons Louées

Ce sont des lignes louées qui permettent la transmission de données à moyens et hauts débits (2,4 Kbps à 140 Mbps) en liaison point à point ou multipoints (service Transfix).

L'utilité réelle d'une liaison spécialisée débute avec l'intensification de l'utilisation de messagerie dans le mode de fonctionnement de l'entreprise. L'avantage est économique. La connexion se fait au forfait et non plus au temps passé sur la ligne. Un second avantage réside dans l'évolution technique. L'entreprise peut très bien retenir une solution à 128 Kbits puis évoluer en fonction des besoins vers une connexion à 512 Kbits. A noter que l'obligation de " tirer " une ligne particulière vers l'entreprise peut générer un surcoût important.

En Europe, on distingue cinq types de lignes selon leur débit :

- E0 (64Kbps)
- E1 = 32 lignes E0 (2Mbps)
- E2 = 128 lignes E0 (8Mbps)
- E3 = 16 lignes E1 (34Mbps)
- E4 = 64 lignes E1 (140Mbps)

Aux Etats-Unis la notation est la suivante :

- T1 (1.544 Mbps)
- T2 = 4 lignes T1 (6 Mbps)
- T3 = 28 lignes T1 (45 Mbps).
- T4 = 168 lignes T1 (275 Mbps).

## X25

L'architecture X.25 est une pile de protocoles définissant l'accès synchrone à un réseau à commutation de paquets. Elle définit donc l'interface entre le réseau et l'utilisateur.

Le X.25 est un protocole de communication normalisé par commutation de paquets en mode point à point offrant de nombreux services.

## ATM

**Asynchronous Transfer Mode** ou **ATM** — littéralement « mode de transfert asynchrone » — est un protocole réseau de niveau 2 à commutation de cellules, qui a pour objectif de multiplexer différents flots de données sur un même lien utilisant une technique de type TDM ou MRT (multiplexage à répartition dans le temps).

ATM a été conçu pour fournir un standard réseau unifié qui pourrait supporter un trafic réseau synchrone (SDH), aussi bien qu'un trafic utilisant des paquets (IP, relais de trames...) tout en supportant plusieurs niveaux de qualité de service (QoS).

ATM est un protocole asynchrone, s'appuyant fréquemment sur une couche de transport synchrone. C'est-à-dire que les cellules ATM sont envoyées de manière asynchrone, en fonction des données à transmettre, mais sont insérées dans le flux de données synchrones d'un protocole de niveau inférieur pour leur transport.

### Commutation de cellules

Les cellules ATM sont des segments de données de taille fixe de 53 octets (48 octets de charge utile et 5 octets d'en-tête), à la différence de paquets de longueur variable, utilisés dans des protocoles du type IP ou Ethernet.

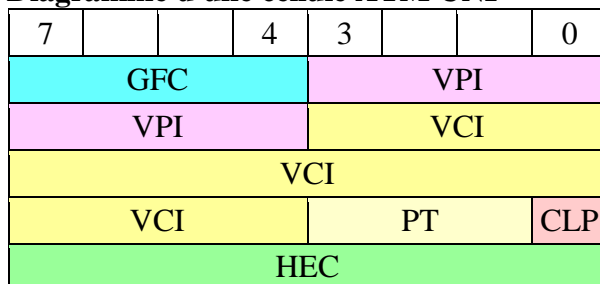
La commutation des cellules allie la simplicité de la commutation de circuits et la flexibilité de la commutation de paquets. Un circuit virtuel est établi soit par configuration des équipements, soit par signalisation, et l'ensemble des cellules seront commutées sur ce même circuit virtuel par commutation de labels. En particulier, le chemin utilisé dans le réseau ne varie pas au cours du temps puisqu'il est déterminé lors de l'établissement du circuit virtuel.

Les labels permettant la commutation des cellules sont portés dans l'en-tête de chaque cellule.

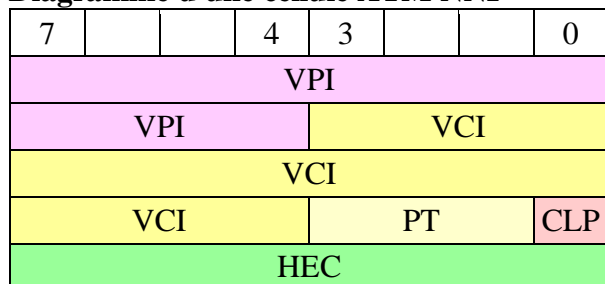
### Structure d'une cellule

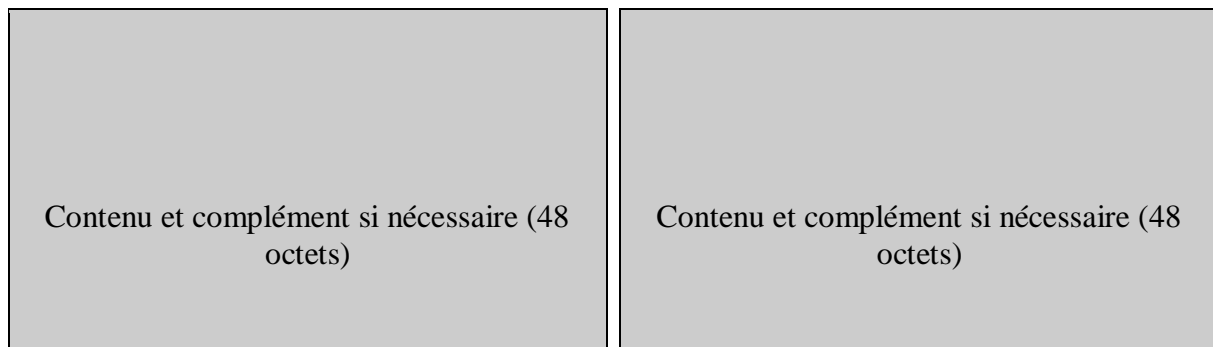
Une cellule ATM est composée de cinq octets d'en-têtes et de quarante-huit octets de contenu. Le protocole définit deux types de cellules : NNI (Network-Network Interface) et UNI (User-Network Interface).

**Diagramme d'une cellule ATM UNI**



**Diagramme d'une cellule ATM NNI**





GFC : Generic Flow Control (4 bits), par défaut 0000b

VPI : Virtual Path Identifier (UNI 8 bits, NNI 12 bits)

VCI : Virtual Channel Identifier (16 bits)

PT : Payload Type (3 bits)

CLP : Cell Loss Priority (1 bit)

HEC : Header Error Control (8 bit CRC)

Le champ *payload type* permet de marquer des cellules pour des cas particuliers, par exemple pour l'administration (opérations, administration and management : OA&M) ou pour délimiter les limites dans certains AALs.

Une cellule UNI réserve le champ GFC pour assurer un système de contrôle de flux ou un sous multiplexage entre les utilisateurs. L'idée était de pouvoir autoriser la connexion de plusieurs terminaux sur une seule connexion au réseau.

Une cellule NNI est analogue à une cellule UNI, mais les 4 bits du champ GFC sont réalloués au champ VPI l'étendant à 12 bits. Ainsi, une interconnexion ATM NNI est capable d'adresser les  $2^{16}$  circuits virtuels (VC) de chacun des  $2^{12}$  chemin virtuels (VP). En pratique, certains chemin et circuits sont réservés.

### **Couches AAL (ATM Adaptation Layer)**

Les couches adaptatives ATM sont chargées de segmenter et de réassembler les cellules provenant des applications. ATM a été conçu pour pouvoir transporter des flux de données variés, la vidéo, la voix ou des données. Mais le transport de ces différents types de flux de données nécessite des types de services différents. Par exemple, les contraintes sur les données ne sont pas les mêmes pour le transport de la voix. Pour faire face à ces divers besoins des applicatifs, diverses couches AAL ont été définies :

- AAL1 : adapté aux applications vidéo et audio à débit constant, comme le transport de la voix.
- AAL2 : adapté aux applications vidéo et audio à débit variable.
- AAL3/4 : adapté en transfert sécurisé de données.
- AAL5 : adapté au transport de données.

### **MPLS (Multiprotocol Label Switching)**

Dans les réseaux informatiques et les télécommunications, **MultiProtocol Label Switching (MPLS)** est un mécanisme de transport de données basé sur la commutation d'étiquettes ou "labels", qui sont insérés à l'entrée du réseau MPLS et retirés à sa sortie.

À l'origine, cette insertion s'opère entre la couche de liaison de données (niveau 2) et la couche réseau (niveau 3) afin de transporter des protocoles comme IP. C'est pourquoi MPLS est qualifié de protocole de couche « 2,5 ».

Ce protocole a évolué pour fournir un service unifié de transport de données pour les clients en utilisant une technique de commutation de paquets. MPLS peut être utilisé pour transporter pratiquement tout type de trafic, par exemple la voix ou des paquets IPv4, IPv6 et même des trames Ethernet ou ATM.

MPLS permet d'acheminer sur une unique infrastructure différents types de trafic tout en respectant les contraintes de fonctionnement associées.

### **Fonctionnement**

MPLS fonctionne par commutation d'étiquettes. Des chemins entre PE (*Provider Edge*) sont établis de façon manuelle (action d'un administrateur dans le plan d'administration) ou automatique (via un protocole de signalisation comme LDP — Label Distribution Protocol — dans le plan de contrôle).

Un chemin MPLS étant toujours unidirectionnel, on fait la différence en MPLS entre les routeurs d'entrée (PE ou iLSR — *ingress Label Switch Router*), de transit (P-router pour *Provider router*), et de sortie (PS ou eLSR — *egress Label Switch Router*).

Le routeur d'entrée a pour rôle d'encapsuler le trafic reçu sur ses interfaces « clients ». Il applique (au moins) une étiquette au paquet reçu et l'envoie vers une de ses interfaces sortantes. Pour créer l'étiquette, le routeur utilise les FEC (*Forwarding Equivalence Class*), qui sont des tables de correspondances dont les clefs sont un élément du paquet (adresse MAC, adresse IP, Class of Service, port TCP/UDP, etc.). Une FEC est donc un groupe de paquets transférés vers la même interface de sortie et avec les mêmes critères de transmission. Le paquet atteint ensuite des commutateurs de transit (P-router). Ceux-ci possèdent une table de commutation comportant quatre entrées :

Deux clefs :

- interface d'entrée du paquet ;
- étiquette MPLS en entrée.

Deux valeurs :

- étiquette MPLS de sortie (ou retrait du label) ;
- interface de sortie du paquet.

L'opération de commutation est donc extrêmement simple, puisqu'il suffit d'analyser l'étiquette MPLS qui se trouve directement après l'en-tête de la trame de niveau 2 (Ethernet), ou dans l'équivalent de la cellule/trame de niveau 2 (VPI/VCI de l'ATM, DLCI du Frame Relay, etc.). Il n'est donc pas nécessaire d'extraire le paquet IP et de parcourir l'ensemble de la table de routage. Toutefois, si cet argument était à l'origine de la création de MPLS, il a perdu beaucoup de poids, car l'augmentation de la puissance des routeurs et l'avènement de nouvelles puces dédiées permettent largement de parcourir la table de routage IP à chaque nouveau paquet. Ce sont donc les autres possibilités attribuées à MPLS qui en font une technique de plus en plus utilisée.

Si la configuration manuelle est toujours possible, elle s'avère très fastidieuse pour l'administrateur, c'est pourquoi la plupart du temps un protocole de signalisation est utilisé pour établir la connexion, c'est-à-dire les chemins MPLS (LSP, *Label Switched Path*). LDP, norme IETF, est le principal utilisé, mais d'autres protocoles pré-existants ont été étendus (cas de OSPF dit OSPF-TE) ou modifiés (cas de RSVP). Il ne faut en effet pas confondre le RSVP initial, de bout en bout, et le RSVP-TE modifié pour les environnements MPLS, entre PE donc.

Contrairement à IP, MPLS n'est pas un protocole de bout en bout. Il définit seulement une façon d'encapsuler des protocoles de couche 3 (IPv4 comme IPv6), de couche 2 (Ethernet,

PPP, ATM, FR entre autres), et même de couche 1 (PDH, SDH). Il ne faut pas confondre ces protocoles encapsulés, donc transportés par MPLS, avec les protocoles inférieurs (dits de niveau 2) qui permettent de transporter MPLS. Cet ensemble peut paraître confus puisqu'un même protocole peut en même temps être transporté par et transporter MPLS : ainsi des cellules ATM arrivant sur des PE pourront être encapsulées par des PE MPLS reliés à des P-routeurs en ATM !