

Architecture des Réseaux (ARES) 5/5 : **Architectures support**

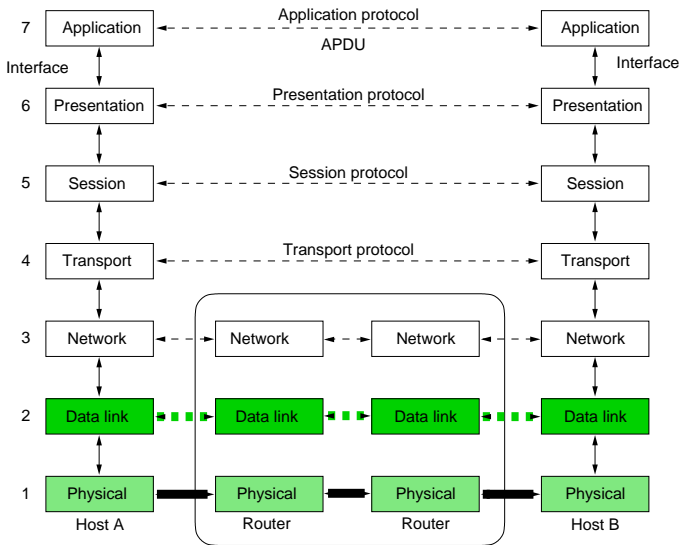
Olivier Fourmaux (olivier.fourmaux@upmc.fr)

Version 6.2

ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

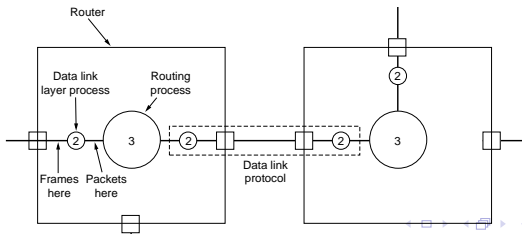
Technologies supports et modèle OSI



OSI : couche liaison de données

La **couche liaison de données** achemine les trames de bits sur **un médium** avec une technique de transmission. Les fonctions associées sont :

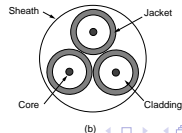
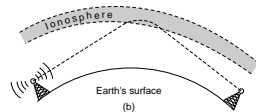
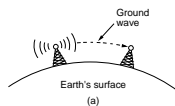
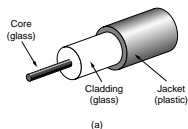
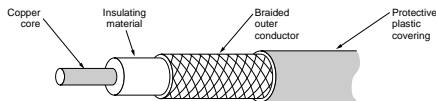
- découpage de trame (*framing*) et contrôle d'erreur
- ordonnancement, fiabilité et contrôle de flux
- trois types de technologie pour la Couche Liaison :
 - **point-à-point**
 - **multipoint sans diffusion** ➡ U.E. **RTEL**
 - **multipoint avec diffusion** (médium partagé)



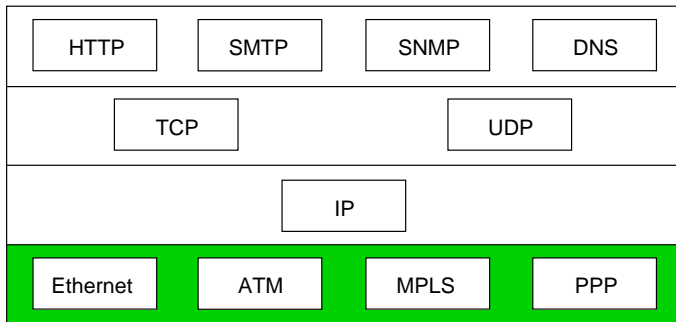
OSI : couche physique

La **couche physique** est associée à la **transmission du signal** :

- spécification des supports et signaux
 - encodage des bits, émission en **bande de base** ou **large bande**
 - caractéristiques des signaux électriques, optique, radio...
 - caractéristique des supports :
 - impédance des câbles élec., atténuation, longueur max. ...
 - fibre optique multimode, monomode...
 - forme des connecteurs, couleur des gaines...



Technologies supports et TCP/IP



Couches OSI [Liaison de données] + [Physique] ~ TCP/IP [Accès au réseau]

ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

Ethernet : introduction

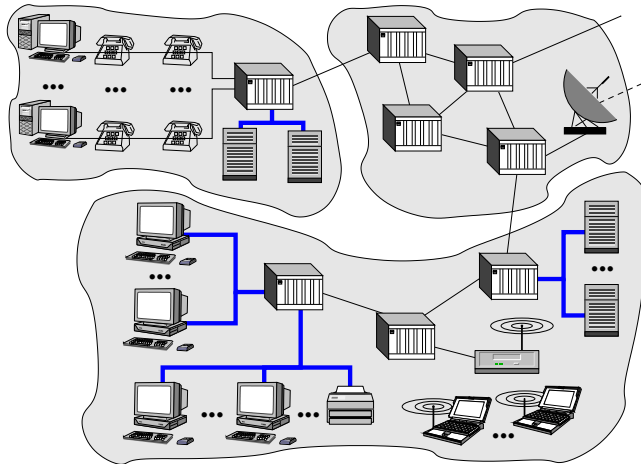
Jusqu'aus années 90 : nombreuses technologies LAN

- Ethernet, Token Ring, FDDI, ATM...

Actuellement (en filaire) : **LAN = Ethernet**

- Ethernet est aux réseaux locaux ce qu'Internet est aux réseaux mondiaux
- pourquoi ?
 - apparu en avance (milieu des années 70)
 - simple
 - décentralisé
 - autoconfigurable
- ➡ économique et évolutif

Ethernet : où ?



Ethernet : variantes

Différents types d'Ethernet...

- deux **topologies** :
 - bus, étoile
- **supports** variés :
 - cables coaxiaux, paires torsadées, fibres optiques
- large choix de **débits** :
 - 10 Mbit/s, 100 Mbit/s, 1 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40/100 Gbits/s

... mais toujours la même base :

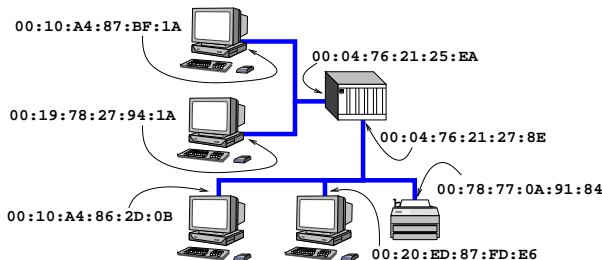
- **adresses LAN**
- **structure de la trame**
- **service** non connecté non fiable
- transmission généralement **bande de base** (numérique)

Ethernet : adresses LAN

Adresses de l'adaptateur (sur 6 octets, notation hexadécimale)

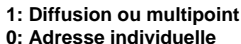
■ identifiant

- aussi appelées :
 - adresses Ethernet
 - adresses physiques (*physical address*)
 - adresses MAC (*Media Access Control address*)
- adressage à plat administré par l'IEEE



Délimitation de la trame :

- fin



Ethernet : structure de la trame (2)

Adresses destination et source :

- l'adaptateur n'accepte que les trames qui lui sont destinées

Type ethernet (*Ethertype*) > **1500** :

0x0800 = DoD Internet

0x0801 = X.75 Internet

0x0802 = NBS Internet

0x0803 = ECMA Internet

0x0806 = ARP

0x8035 = RAP

0x8098 = Appletalk

0x86DD = IPv6...

Données :

- MTU (*Maximum Transfer Unit* : taille max.) = 1500 octets
- taille minimum = 46 octets avec si besoin, ajout d'octets de bourrage (transmis à la couche réseau)

CRC-32 (*Cyclic Redundancy Check*), polynome générateur :

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

Ethernet : service

Service à la couche réseau :

- **sans connexion**

- service datagramme (identique à IP ou UDP)
- pas d'échange préalable à l'envoi de données

- **non fiable**

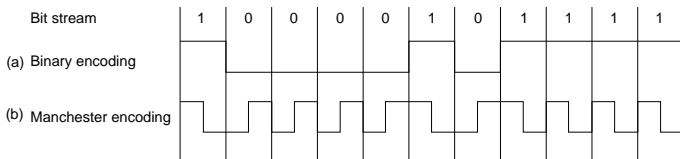
- contrôle d'erreur (et élimination sans indication)
- pas de correction d'erreur
- pas d'acquittement
 - l'émetteur n'a pas connaissance de la remise des données
 - pas de contrôle de flux (sauf commutateurs)
 - pas de fenêtre d'anticipation
 - détection des pertes dans les couches supérieures (ex : TCP...)

⇒ simplicité

Ethernet : transmission

Bande de base

- émission directe des signaux numériques
- codage **manchester** pour les débits à 10 Mbps
 - bande passante de 20 Mhz nécessaire (1B/2B)
- pour les débits supérieurs, 4B/5B (FDDI), 8B/10B (Fiber Channel), 64B/66B et diverses encapsulations (FR, ATM, SONET...)



Protocoles d'accès au médium

Liaisons directes émetteur récepteur ➡ voir la suite

Liaisons partagées :

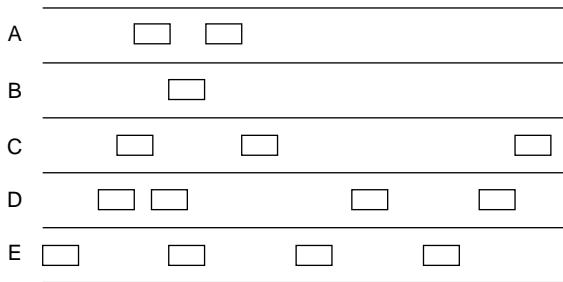
- protocoles de **partage de canal**
 - partage fixe de la bande passante (R/N par émetteur)
 - multiplexage fréquentiel (**FDM**)
 - multiplexage temporel (**TDM**)
- protocoles à **partage de resource** (*taking-turns protocols*)
 - partage déterministe de la bande passante (R par émetteur)
 - invitation à émettre (*polling*)
 - passage de jeton (*token-passing*)
- protocoles d'**accès aléatoire**
 - partage statistique de la bande passante (R par émetteur)
mais collisions possibles
 - **ALOHA**
 - **CSMA** ➡ Ethernet

ALOHA

Université d'Hawaii 70'

- technologie support d'un réseau radio basé sur des **datagrammes**
- protocole à accès **aléatoire** complètement **décentralisé**
- si **collision**, retransmission après un temps aléatoire

User

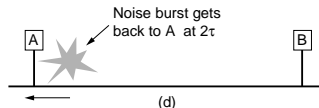
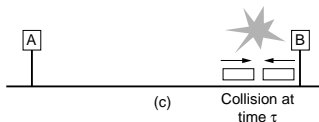
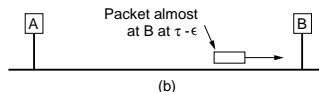
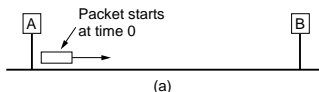


Time →

CSMA

Amélioration de l'approche aléatoire

- **détection de porteuse** : CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) \Rightarrow attente avant émission
- **détection de collision** : CSMA/CD (*CSMA with Collision Detection*) \Rightarrow retransmission
 - exemple avec une taille de trame mini de **64 octets**
 - **T détection** : 64 octets à 10Mbps = $512/10^7 = 51,2\mu\text{sec}$
 - **T prop. max** : $2 * 2500\text{m}$ à $2.10^8\text{ms}^{-1} = 25\mu\text{sec} + 8 * t_{\text{repet}}$



Protocole d'accès Ethernet (1)

Fonctionnement des adaptateurs :

- début d'émission à tout moment : **temps non discrétisé**
- pas d'émission si détection d'une activité sur le canal : **CSMA**
- interruption de la transmission si autre activité : **/CD**
- attente aléatoire croissante avant retransmission : **TBEB**
(*Truncated Binary Exponential Backoff*)

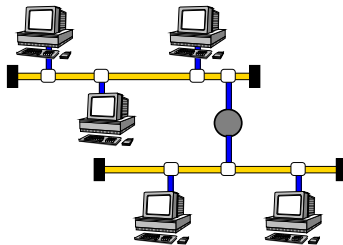
Protocole d'accès Ethernet (2)

Etapes du protocole mis en œuvre dans les adaptateurs :

- ➊ construction et mémorisation de la trame
- ➋ si activité détecté, attente fin signal
- ➌ attente IFS de 96 bits (sans détection de signal)
- ➍ début transmission
 - ➊ si détection collision :
 - ➊ interruption de la transmission
 - ➋ signal de brouillage de 32 bits *jam sequence*
 - ➌ attente exponentielle (pour la $n^{ième}$ collision consécutive) de $\text{int}(\text{rand()} * 2^{\min(10, n)}) * 512$ bits (*exponential backoff phase*) puis retour à l'étape 2.
 - ➋ sinon continue la transmission jusqu'à la fin

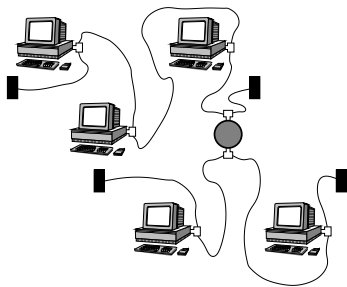
Ethernet : 10Base5

- débit : **10** Mbps
- topologie : **bus** étendu, avec stations reliées aux **transceivers** agrippés au câble coaxial par un câble **bleu** (51.2 μ s max entre 2 stations ➡ 4 répéteurs + 2500m max.)
- médium : coax. **jaune** de 500m max. et 2 terminateur 50 Ω



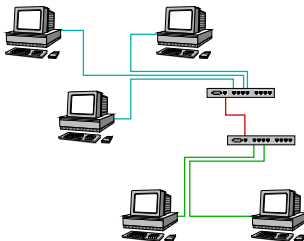
Ethernet : 10Base2

- débit : **10** Mbps
- topologie : **bus** étendu ($51.2\mu s$ max \Rightarrow 4 répéteurs et 925m max. entre 2 stations)
- médium : câble coaxial **noir** de 200m (185m max) et 30 stations max par segments, **connecteurs BNC en "T"** et terminateurs 50Ω



Ethernet : 10BaseT

- débit : **10** Mbps
- topologie : **étoile** à partir d'un **hub** (concentrateur)
- médium : **paire torsadée** de 100m max. (UTP3), **conn. RJ45**
- accès :
 - **half duplex** ➡ CSMA/CD
 - plusieurs hubs possibles, reliés en cascade (51.2μs max)
 - **full duplex** ➡ point-à-point bidirect. simultané (sans collision)
- détection d'activité (*Link Pulse* toutes les 16 ± 8 ms)



Ethernet : 100BaseTX (Fast Ethernet, 1995)

- débit : **100** Mbps
- topologies : étoile à partir d'un **hub** (concentrateur)
- médium : paires torsadées de 100m max (**UTP5**), conn. RJ45
- encodage : 4B/5B (FDDI)
- accès :
 - **half duplex** ➡ CSMA/CD avec toujours 64 octets mini
 - 2 *hubs* peuvent être reliés (mais 5.12μs max : 210m max)
 - distance limité en entreprise... voir les commutateurs
 - **full duplex** ➡ point-à-point bidirectionnel simultané
- détection d'activité (*Fast Link Pulse* : 33 impulsions/~16 ms)
 - FLP contient 16 bits pour l'**auto-négociation**
 - détection des vitesses, modes et mécanismes disponibles
- plusieurs variantes :
 - 100BaseT4 : 4 paires torsadées UTP3 (pas de *full duplex*)
 - 100BaseFX : 2 fibres optiques (400m MMF, 20km SMF)

Ethernet : 1000BaseT (Gigabit Ethernet, 1998)

- débit : **1000** Mbps (1 Gbps)
- topologies : étoile à partir d'un **hub** (concentrateur)
- médium : paires torsadées de 100m max. en UTP5+ (4 paires)
- encodage : 8B/10B (= Fiber Channel 1G)
- accès :
 - **half duplex** ➡ CSMA/CD avec **512 octets mini** (extension de portuse si besoin) ➡ $4.01\mu\text{s}$ plutôt que $0.512\mu\text{s}$!
 - 2 *hubs* peuvent être reliés (toujours 210m max)
 - **performance ?** *burst* possible pendant l'extension
 - **full duplex** ➡ point-à-point bidirect. simult.
- plusieurs variantes :
 - 1000BaseCX : 2 paires torsadées blindées STP : 25m
 - 1000BaseSX : fibres optiques MMF à 850nm) : 500m
 - 1000BaseLX : fibres optiques MMF et SMF 1300nm : 5km

Ethernet : 10GBaseT (10Gigabit Ethernet, 2002)

- débit : **10 Gbps**
- topologies : étoile à partir de **commutateurs**
- médium :
 - fibres optiques :
 - sur MMF et SMF (de 65m à 40km max.)
 - multiplex SONET/SDH : OC192 (10Gbit/s)
 - paire torsadée :
 - 100m max. avec paires torsadée cat. 6e (FTP 500MHz), 6a (UTP 500MHz) et 7 (STP 600MHz)
- accès : **full duplex** uniquement (plus de CSMA/CD)
- encodage : 64B/66B (= Fiber Channel 10G)

Ethernet : 40/100G (100Gigabit Ethernet, 2009)

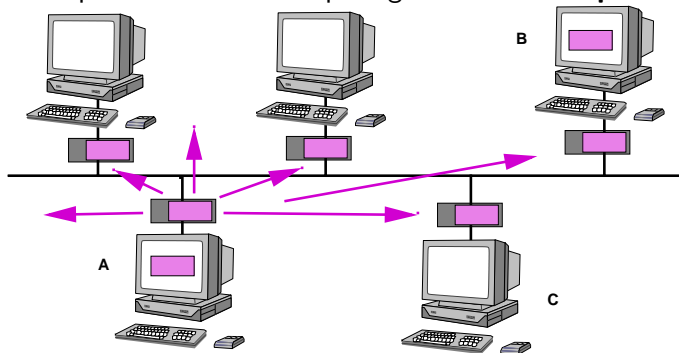
- débit : **40/100 Gbps**
- topologies : étoile à partir de **commutateurs**
- médium :
 - fibres optiques :
 - 100m sur OM3 MMF
 - 40km max. sur SMF
 - multiplex SONET/SDH : OC768 (40Gbit/s)
 - paire torsadée :
 - qqs m. (*backplane*)
- accès : **full duplex** uniquement

Réseaux à diffusion

Transport d'IP :

- **résolution d'adresses**
- **format d'encapsulation**

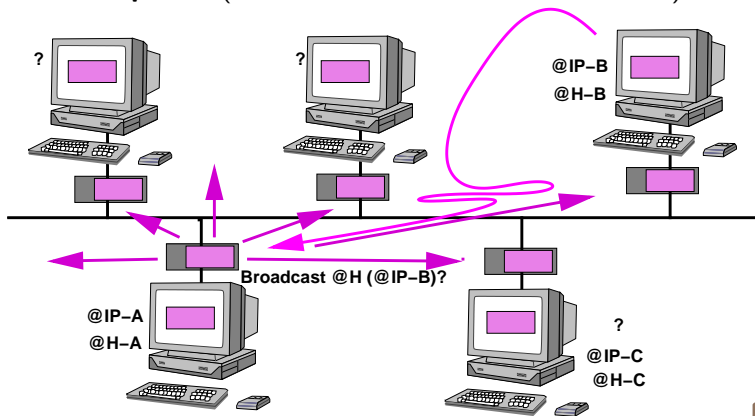
Accès multiples sur un médium partagé : **diffusion implicite**



ARP : résolution d'adresse

Address Resolution Protocol

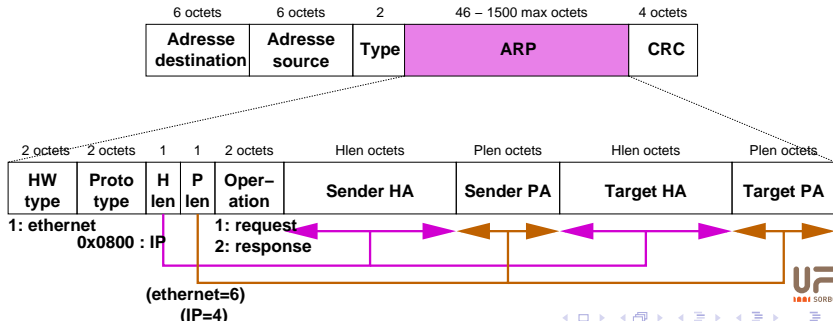
Diffusion explicite (utilisation d'une adresse de diffusion)



ARP sur Ethernet

ARP est un protocole transporté directement dans la trame *Ethernet* :

- **ARP request** : adresse destination = diffusion (FF:FF:FF:FF:FF:FF), source = demandeur
- **ARP response** : adresse destination = demandeur, source = répondeur



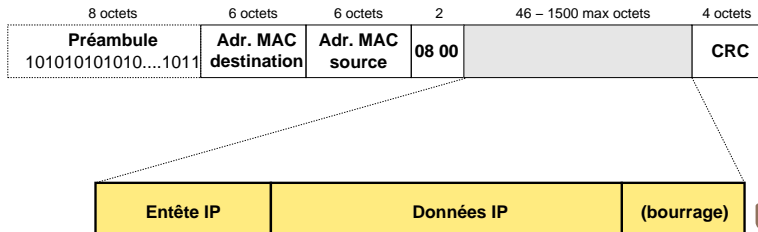
IP sur Ethernet

Type Ethernet (*Ethertype*) > **1500** :

0x0800 = DoD Internet

Données :

- MTU : taille maximum du paquet IP = 1500 octets
- taille minimum = 46 octets (le paquet IP peut faire moins)
 - si besoin, ajout d'octets de bourrage (transmis à IP)

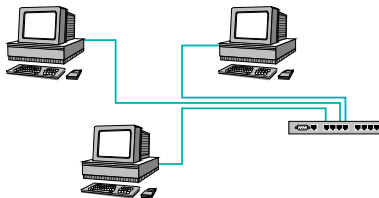


ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

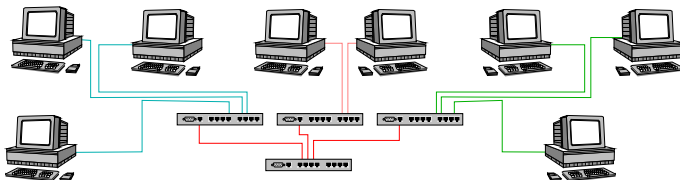
Hub Ethernet (Concentrateur)

- élément de la couche **physique** (niveau bit)
- **répéteur multiport**
 - un bit arrivant sur une interface est diffusé sur les autres
- possibilité d'**administration** : SNMP, RMON...
- interconnexion de *hubs*
 - linéaire
 - hiérarchique avec **hub fédérateur**...



Interconnexion de *hubs*

- dans un système multi-niveau (plusieurs hubs)
 - **LAN** = l'ensemble du réseau local = domaine de collision)
 - **segment** = les équipements reliés à un *hub*
- intérêts :
 - ✓ augmente la connectivité
 - ✓ augmente la redondance (déconnexion des *hubs* en panne)
 - ✗ limitations physiques (distance, nb machines...)
 - ✗ diminution du débit par machine
 - ✗ augmentation des collisions (et réduction du débit)



Pont Ethernet (*Bridge*)

- élément de la couche **liaison** (niveau trame)
- **commutateur de trames**
 - filtre en fonction des adresses destinations
 - une trame arrivant est transmise au port vers le destinataire
 - **mémorisation** + **CSMA/CD** (équipement sans adresse)
- intérêts :
 - ✓ séparation des domaines de collision
 - ✓ multi-technologie (10Base2 avec 100BaseTX...)
 - ✓ plus de limitations physiques

Pont : Filtrage et relayage

Filtrage (*filtering*)

- détermination de l'acceptation ou du rejet d'une trame

Relayage (*forwarding*)

- choix de l'interface de sortie

⇒ table :

Adresse LAN	Interface	Heure
00:10:A4:86:2D:0B	1	09 : 32 : 55
00:04:76:21:27:8E	3	09 : 32 : 55
00:04:76:21:1B:95	3	09 : 32 : 55
...

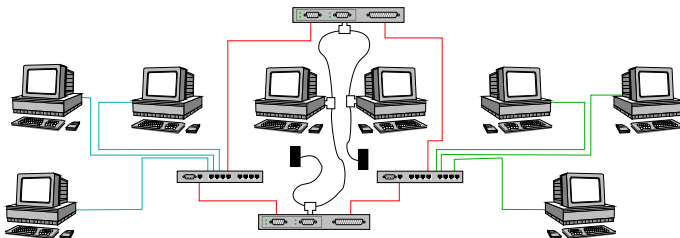
- algorithme d'utilisation de la table :
 - lorsque qu'une trame avec @LAN_dest arrive par If_x, la table indique comme port de sortie IF_y :
 - si IF_x = IF_y alors la trame provient du segment du destinataire ⇒ **filtrage**
 - sinon la trame est transmise à IF_y ⇒ **relayage**

Pont : auto-apprentissage (*self-learning*)

- algorithme de création de la table
 - 1 table **vide** initialement
 - 2 lors de la réception d'une trame, insertion dans la table de :
 - 1 son @LAN_source
 - 2 son interface d'arrivée
 - 3 son heure d'arrivée
 - 3 validité limitée dans le temps
- remarques :
 - si @LAN_dest absente de la table, alors **diffusion** (recopie vers les autres interfaces, mémorisation + CMA/CD)
 - les ponts sont dits :
 - auto-adaptatifs (*plug and play*)
 - transparents (non adressés)

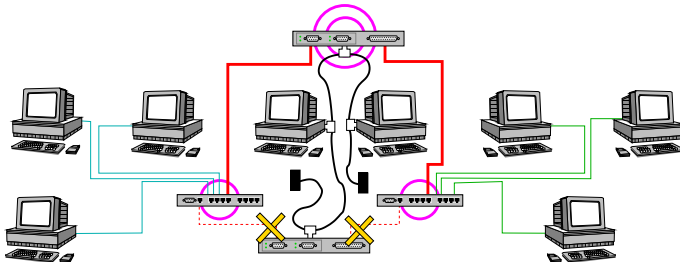
Ponts : redondance

- chemins multiples
 - ✓ chemin de secours
 - ✓ auto-configuration
 - ✗ création de boucles (duplication)
 - protocole d'arbre couvrant (STP)



Ponts : STP (*Spanning Tree Protocol*)

- réseaux pontés avec redondance ~ graphe (nœuds = ponts)
 - graphe sans boucle = arbre ➡ construction d'un **arbre couvrant**
 - pont avec un numéro identificateur : le plus petit est la **racine**
 - échange de BPDU <id_root, dst_root, id_snd, num_port>
 - inhibition** des ports qui n'atteignent pas la racine par le **plus court chemin**



Pont ou routeur

Pont (couche 2) : commutateur de **trames**

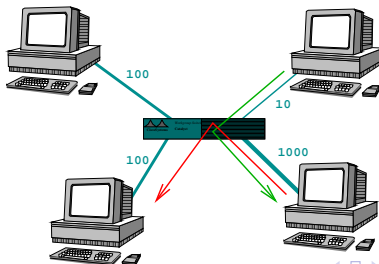
- ✓ auto-configurable
- ✓ performance de relaying
- ✗ toutes les trames empruntent le même arbre couvrant (SPF)
- ✗ les diffusions (*broadcast*) sont globales
 - réseau de taille limitée (→100 machines)
 - recherche de simplicité

Routeur (couche 3) : commutateur de **paquets**

- ✓ pas de boucle (TTL limitatif en transitoire)
- ✓ calcul du meilleur chemin (routage)
- ✗ configuration manuelle
- ✗ traitement plus long des messages
 - réseau taille importante (1000→ machines)
 - fonctions “intelligentes” : isolation de trafic, filtrage...

Commutateur Ethernet (*switch*)

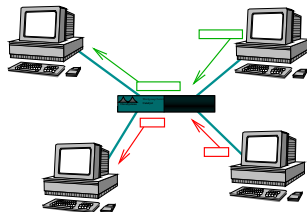
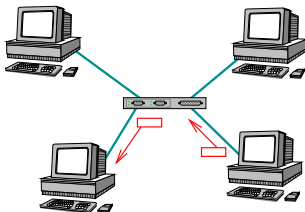
- high performance *bridge* (layer 2)
 - many interfaces (\sim *hub*)
 - high aggregate bandwidth \Rightarrow **switching fabric**
- multi-bandwidth
 - 10 Mbps, 100 Mbps, 1 Gbps...
- **full duplex**
 - possible to avoid CSMA/CD (\sim point-to-point links)



Commutation “store and forward”

Mémorisation puis transmission de la trame

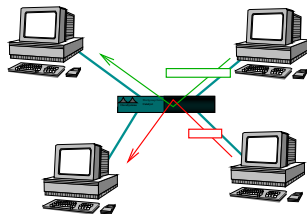
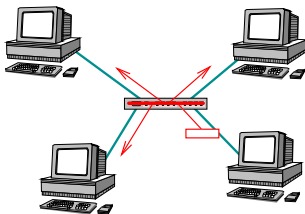
- ~ fonctionne comme un pont
- stockage complet avant retransmission (et calcul du CRC-32)
- latence mini de L_F/R_i (L_F taille trame, R_i débit du lien de sortie)



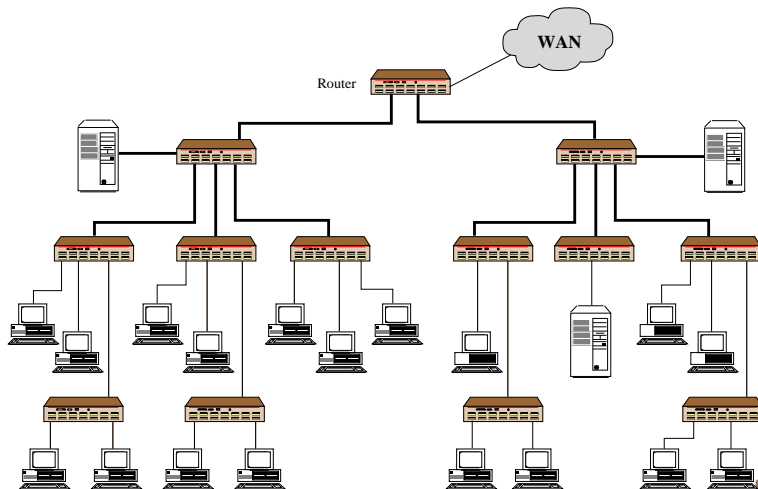
Commutation “cut-through”

Transmission directe

- ~ fonctionne comme un *hub*
- émission dès que le tampon de sortie est vide
- latence mini = lecture de l'adresse destination
 - exemple : 100Mbps, trame de 1518 octets ➡ gain de $\sim 120\mu s$
- plus de contrôle de la trame (CRC-32)



Hiérarchie Ethernet (1)



Hiérarchie Ethernet (2)

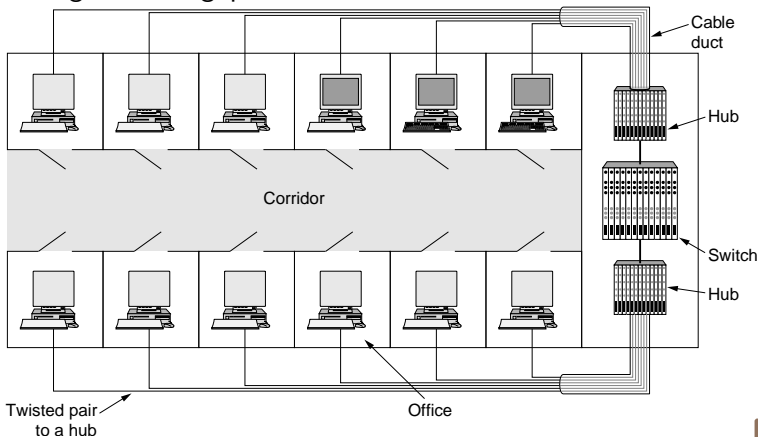
Fonctionnalités complémentaires liées au *full duplex* :

- **contrôle de flux** (*back pressure*)
 - évite la perte de trame dans un commutateur saturé
 - envoi d'une trame PAUSE à l'émetteur trop rapide (IEEE 802.3x)
- **agrégation de liens** (*link aggregation, Ethernet trunk, NIC teaming, port channel, port teaming, port trunking, link bundling, EtherChannel, Multi-link trunking (MLT), NIC bonding, network bonding, Network Fault Tolerance (NFT)...*)
 - utilisation de plusieurs câbles/ports en parallèle pour augmenter le débit et la redondance
 - mêmes commutateurs, débits des liens identiques
 - standardisation tardive (IEEE 802.3ad en 2000 puis 802.1ax en 2008 avec le *Link Aggregation Control Protocol*)
- **virtualisation** ...

VLAN (1)

Infrastructure de câblage générique

➡ configuration logique des LAN : **Virtual LAN**

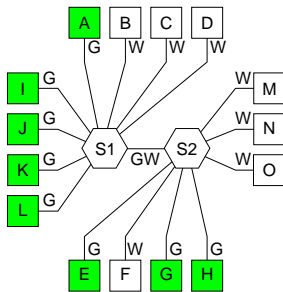
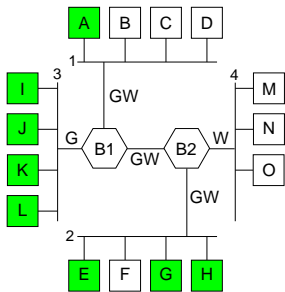


picture from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

VLAN (2)

Table de configuration dans les ponts et commutateurs

- détermination de l'appartenance à un VLAN
 - par port
 - par adresse LAN
 - par protocole ou réseau de la couche 3
- plusieurs VLAN par port pour le transit (*Virtual STP*)



picture from TANENBAUM A.S. *Computer Networks 4rd edition*

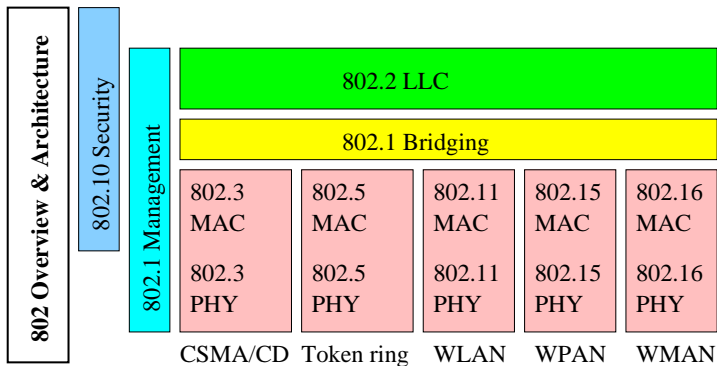


ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

Standardisation IEEE 802

Définition de l'architecture de standardisation :



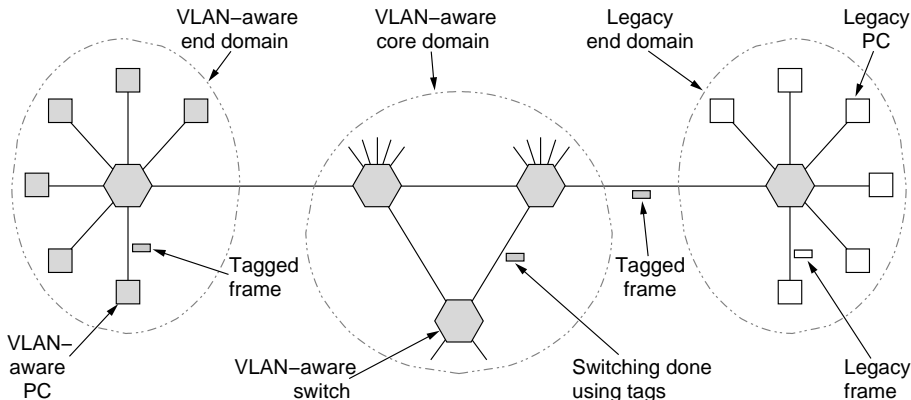
802.1x

Quelques standards intéressants :

- **802.1d** *MAC Bridges*
 - protocole STP...
- **802.1f** *MIB IEEE 802*
- **802.1g** *MAC distant bridging*
 - interconnexion de LAN avec des technologies WAN
- **802.1h** *MAC Bridging of Ethernet V2 in IEEE 802 LAN*
- **802.1q** *Virtual Bridged LAN...*

802.1q (1)

Ajout d'un identifiant de VLAN dans la trame :

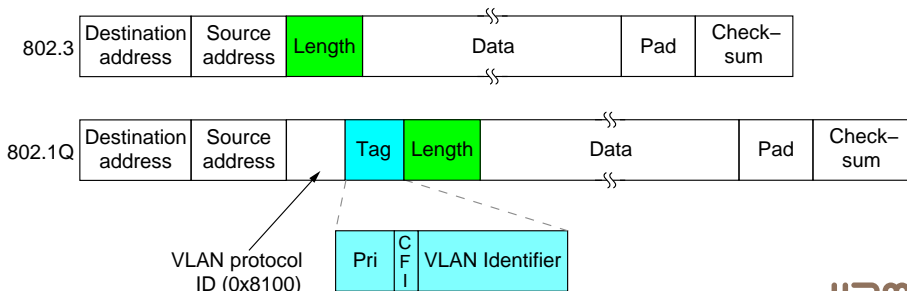


picture from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

802.1q (2)

Evolution de la structure la trame Ethernet : **1522 octets max !**

- seuls les équipements 802.1q échangent les nouvelles trames
- 4096 VLAN identifiables
- 3 bits de priorité



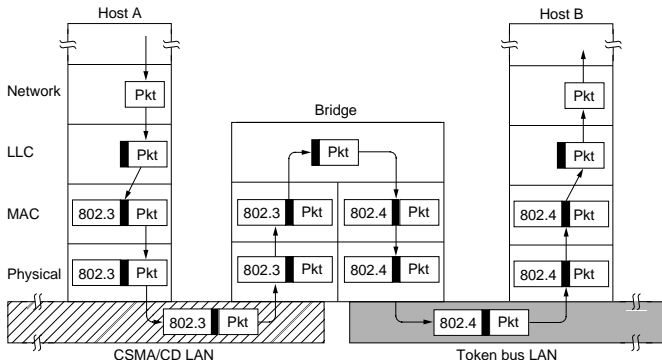
picture from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

Pontage 802.2

Subdivision en 2 sous-couches de la Couche ISO Liaison

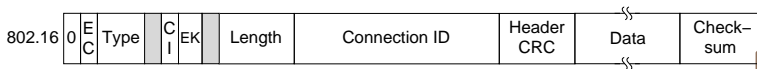
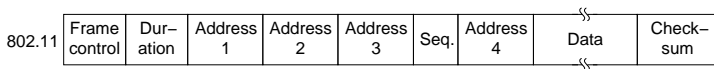
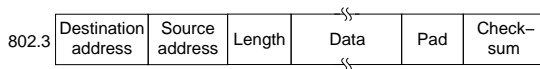
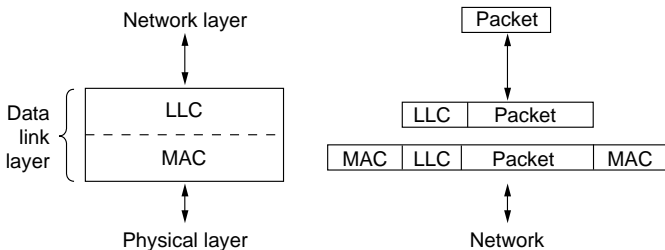
- **LLC** (*Logical Link Control*) sublayer
- **MAC** (*Medium Access Control*) sublayer

➡ permet le pontage direct des différents réseaux IEEE 802 :



picture from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 3rd edition*

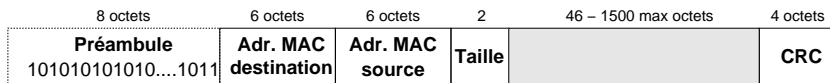
IEEE 802.2



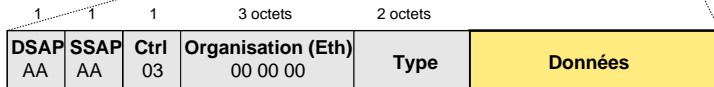
picture from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

IEEE 802.3 : CSMA/CD

Encapsulation SNAP/LLC :



Sous couche MAC



SNAP

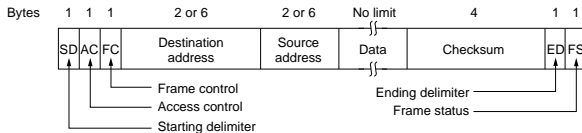
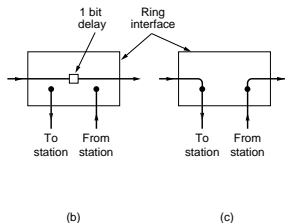
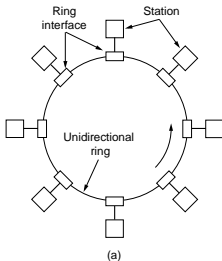
LLC

Sous couche LLC

IEEE 802.3 : appellations

802.3	1985	10Base5	coaxial épais 50Ω
802.3a	1988	10Base2	coaxial fin 50Ω
802.3b	1985	10Broad36	coaxial TV 75Ω
802.3i	1990	10BaseT	sur 2 paires UTP3
802.3j	1993	10BaseF	sur fibres MM/SM
802.3u	1995	100BaseT4	sur 4 paires UTP3
802.3x/y	1997	100BaseT2	sur 2 paires UTP5
802.3z	1998	1000BaseX	module GBIC
802.3ab	1999	1000BaseT	sur 4 paires UTP5
802.3ac	1998		VLAN pour 802.3
802.3ad	2000		Agrégation (<i>trunking</i>)
802.3ae	2002	10GBaseX	sur fibres MM/SM
802.3af	2003		Power-over-Ethernet
802.3ah	2004		Ethernet in the First Mile
802.3an	2006	10GBASE-T	sur FTP6e ou UTP7
802.3ap	2007		Backplane Ethernet
802.3av	2009		10 Gbits/s PHY EPON
802.3ba	2009		Ethernet 40 et 100 Gbits/s

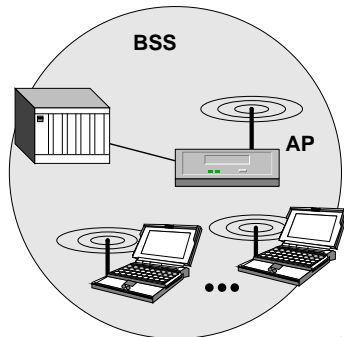
IEEE 802.5 : Token Ring



(b)

IEEE802.11 : WLAN (*Wireless Ethernet*)

- zone de service : cellule ou BSS (*Basic Service Set*)
 - stations sans-fil
 - station de base (fixe) ou AP (*Access Point*) servant de pont 802
- MAC : **CSMA/CA**



ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

Communication **directe** entre deux entités

Fonctions principales en point-à-point :

- **découpage de trame** (*framing*)
- des fonctionnalités similaires à celles de la couche transport peuvent aussi intervenir (sauf contrôle de **congestion**) :
 - contrôle d'erreur
 - contrôle de flux
 - ordonnancement (numérotation)
 - anticipation (*sliding window*)
 - fiabilité (acquittements et retransmissions)

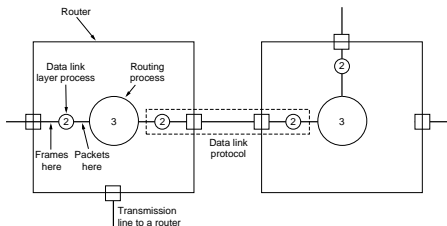
Pour le transport de données :

- pas de résolution d'adresses
- **format d'encapsulation**

Couche liaison de données point-à-point

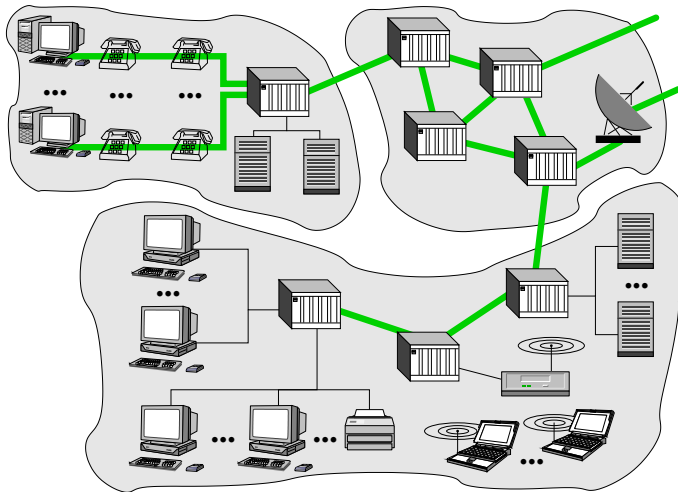
Service point-à-point défini dans la **couche liaison** OSI

- Caractéristiques :
 - technologie d'interface homogène



- unités de transmission variées
 - bits, octets, cellules ...
- couches sous-jacentes variées
 - niveaux intermédiaires possible avant la **couche physique**
 - possibilité de multiples éléments actifs (multiplexeurs, modems, ponts, commutateurs, routeur, passerelles applicatives...)

Liaisons de données point-à-point : Où ?



ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

HDLC : Famille de protocole

La plupart des protocoles de la couche **liaison de données** pour le point-à-point sont apparentés à HDLC :

- SDLC (*Synchronous Data Link Control*) d'IBM pour SNA
- ADCCP (*Advance Data Communication Control Procedure*) version ANSI de SDLC
- **HDLC** (*High-level Data Link Control*) version ISO de SDLC
- LAP (*Link Access Procedure*) version ITU d'HDLC
 - LAP-B pour X25
 - LAP-D pour *ISDN*
 - LAP-F pour *Frame Relay* ...
- **PPP** (*Point-to-Point Protocol*) standard de l'IETF

Ces protocoles s'appuient sur une grande variété de supports **physiques** permettant de transmettre des bits ou autre entre deux machines.

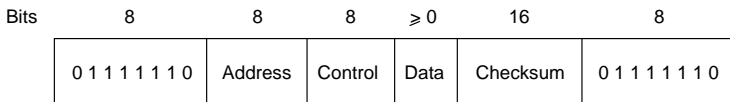
HDLC : structure

Découpage au niveau **bit** ou **octet**

- délimitation par un fanion (*flag*) $\Rightarrow (01111110)_2$
 - suite de bit 01111110 (protection par *bit stuffing*)
 - octet de valeur 0x7E (protection par *byte stuffing*)

3 types de trames (*control*) :

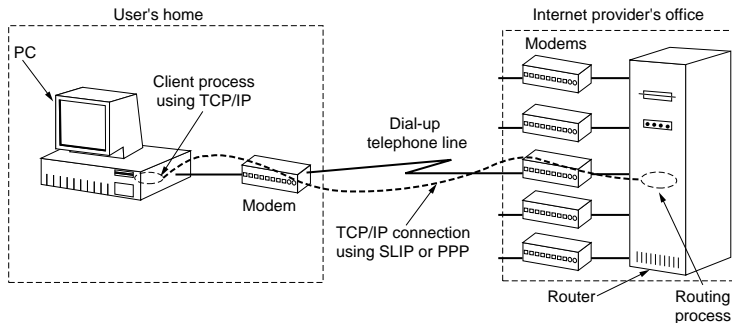
- **Information** : transmission de données avec *sliding window* (7 trames non acquittées max.)
- **Supervisory** : contrôle de flux, ACK non *piggyback*, NACK, demande de retransmission selective...
- **Unnumbered** : pour le contrôle interne à la couche liaison



picture from TANENBAUM A.S., *Computer Networks 3rd edition*

IP sur ligne série

- SLIP (*Serial Line Internet Protocol*)
 - orienté caractère, découpage grâce au caractère 0xC0
 - rudimentaire : aucun contrôle, aucune négociation
- PPP ...



picture from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 3rd edition*

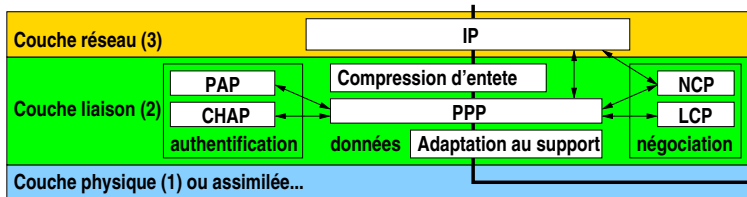
ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

PPP : (*Point-to-Point Protocol*, RFC 1661)

Protocole générique ➡ nombreuses fonctionnalités :

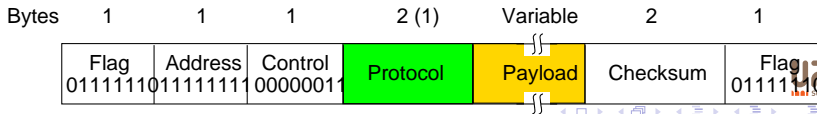
- multiprotocolaire
 - transporte d'autres niveaux 3 que IP
 - s'appuie sur d'autres technologies que les lignes séries
- négociation
 - adaptation au support (détection et correction d'erreur, protection des codes de contrôle des modems, compression d'entête...)
 - configuration automatique du client



PPP : structure protocolaire

Encapsulation simple : ajout de **2 octets** (compressibles à 1 octet)

- **Protocol** : indique le type d'information transportée
 - **LCP** : protocole de contrôle de la couche liaison
 - négociation des paramètres de la couche support (compression, taille des trames...)
 - **PAP** et **CHAP** : protocoles d'authentification
 - **NCP** : protocole de contrôle de la couche réseau
 - négociation des paramètres du protocole transporté (adressage...) ➡ *dépend de chaque couche réseau supportée*
 - **IP**, AppleTalk, IPX, IPv6...
- **Payload** : contient les données de la trame
 - MRU (*Maximum Receive Unit*) négociable (défaut : 1500 o)
 - **bourrage** si la technologie support le nécessite



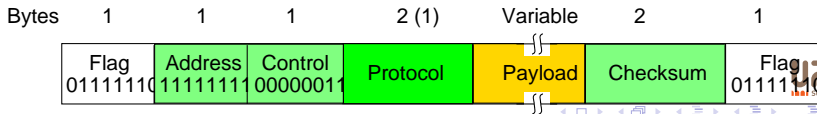
PPP : Protocoles transportés

Valeur	Description
0x0001	Protocole de bourrage
0x0021	IP
0x0029	AppelTalk
0x002B	IPX
0x002D/2F	TCP/IP Compression d'entête de Van Jacobson
0x0057	IPv6
0x0281	MPLS
0x8021	IPCP : configuration d'IP
0x8029	ATCP : configuration d'AppelTalk
0x802B	IPXCP : configuration d'IPX
0x8057	IPV6CP : configuration d'IPv6
0x8281	Configuration de MPLS
0xC021	LCP : <i>Link Control Protocol</i>
0xC023	PAP : <i>Password Authentication Protocol</i>
0xC025	LQR : <i>Link Quality Report</i>
0xC223	CHAP : <i>Challenge Handshake Authentication Protocol</i>

PPP : Encapsulation usuelle

Similaire à une trame **HDLC** pour les flux d'octets :

- un **fanion** (flag) de valeur binaire : 0111 1110 (0x7E)
- address (1 octet) : 1111 1111 (0xFF, diffusion)
 - il n'y a qu'un destinataire (point-à-point)
- control (1 octet) :
 - **liaison fiable** ➡ pas de contrôle : 0000 0011 (0x03, trame UI, voir le RFC 1662)
 - optimisation : suppression des champs Address et Control
 - **liaison peu fiable** ➡ contrôle du séquençement (voir HDLC, trames UA et SABME, voir le RFC 1663)
- Protocol et Payload : encapsulation PPP
- Checksum (2 octets) : CRC 16 bits
- encore un **fanion** de valeur binaire : 0111 1110



PPP : protection du fanion

Deux types de liaison point-à-point :

- **synchrone** (bits : le fanion est la séquence 0111 1110)
 - protection par bourrage au niveau bit (*bit stuffing*)
 - 1 bit à 0 est rajouté tout les 5 bits à 1
 - 01111110111110 ➡ 0111110101111100
- **asynchrone** (octets, le fanion à la valeur 0x7E)
 - protection par échappement au niveau octet (*byte stuffing*)
 - octet d'échappement de valeur 0x7D :
 - 0x7E ➡ 0x7D 0x5E
 - 0x7D ➡ 0x7D 0x5D
 - valeurs d'octets actives pour la gestion de la connexion asynchrone (correspond aux codes ASCII < 32), même principe de protection :
 - 0x11 (XON : reprise du transfert) ➡ 0x7D 0x31
 - 0x13 (XOFF : arrêt du transfert) ➡ 0x7D 0x33

➡ La bande passante disponible est **variable** !

PPP : négociation

Structure de la trame de négociation typique de PPP :

0	7	15	bit 31
code	identificateur	longueur	
données			

- **code** : indique le type de négociation
- **identificateur** : mise en correspondance entre les requêtes et les réponses
- **longueur** : taille totale de la trame avec l'entête LCP
 - permet de supprimer de potentiels octets de bourrage
- **données** : paramètres de la négociation

Les négociations débutent lors de l'initiation de la connexion

PPP : Trames de négociation

Val.	Code	Description	LCP	NCP
1	Configure-Request	modif. aux valeurs par défaut	[✓]	[✓]
2	Configure-Ack	récepteur accepte toutes les modif.	[✓]	[✓]
3	Configure-Nak	valeurs refusées, proposer d'autres	[✓]	[✓]
4	Configure-Reject	valeurs non négociables	[✓]	[✓]
5	Terminate-Request	un des équipements veut terminer	[✓]	[✓]
6	Terminate-Ack	confirmation de la terminaison	[✓]	[✓]
7	Code-Reject	code inconnu	[✓]	[✓]
8	Protocol-Reject	protocole inconnu	[✓]	
9	Echo-Request	demande test l'état de la liaison	[✓]	
10	Echo-Reply	réponse test de l'état de la liaison	[✓]	
11	Discard-Request	supprimée en silence par récepteur	[✓]	

LCP (*Link Control Protocol*)

Supervision de l'état de la liaison

- champ `protocol` de la trame PPP : 0xC021
- négociation initiale à l'ouverture de la connexion
- définition d'options de type TLV
 - voir RFC 1570 et **RFC 1661**
 - format :

1 octet	1 octet	(Longueur - 2) octets
Type	Longueur	Valeur

LCP : types d'options

Val.	Code	Length	Description
1	MRU	4	maximum size of received frames
2	ACCM	6	table of transcoding values
3	authentification	4	type of auth. protocol
4	qualité	6	type of QoS mgt. protocol
5	<i>Magic Number</i>	6	negotiation of this value
7	compression protocol	2	1 byte protocol field
8	compression address and control	2	suppression of these fields
10	self-describing padding	3	padding parameter that can be automatically eliminated
13	callback	3+	...

PAP (*Password Authentication Protocol*, RFC 1334)

Une fois la connexion établie et les paramètres LCP négociés

➡ vérification de l'identité

- champ `protocol` de la trame PPP : 0xC023
- transmission en clair de **l'identifiant** et du **mot de passe**
- 4 types de trames de négociation (Configure-Request, Configure-Ack, Configure-Nak ou Configure-Reject)
- format identique à LCP, valeur du champ code :

- 1 : **demande d'authentification** :

1 o.	(Lgld) octets	1 o.	(LgMP) octets
Lgld	Identificateur	LgMP	Mot_de_passe

- 2 : **acquiescement positif** :

1 o.	(Lgld) octets
Lgld	Message_pour_le_client

- 3 : **acquiescement négatif** (retransmission nécessaire) :

1 o.	(Lgld) octets
Lgld	Message_pour_le_client

CHAP (*CH*allenge *A*uthentication *P*rotocol, RFC 1334)

Après la négociation LCP et pendant la communication

➡ vérification de l'identité

- champ `protocol` de la trame PPP : 0xC223
- les 2 extrémités possèdent une **clé** identique et secrète
- 4 types de trames de négociation (Configure-Request, Configure-Ack, Configure-Nak ou Configure-Reject)
- format identique à LCP, valeur du champ code :

- 1 : **challenge** (envoi d'une séquence binaire) :

1 o.	(LgCh) octets
LgCh	séquence_binaire

- 2 : **réponse** (retour de la séquence cryptée avec la **clé**

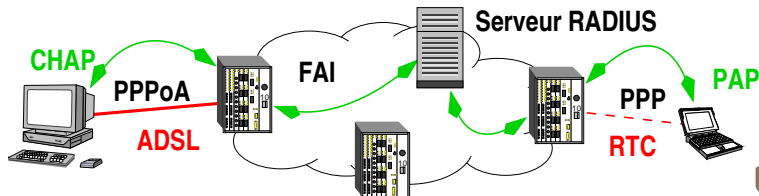
➡ sceau) :	1 o.	(LgCC) octets
	LgCC	séquence_binaire_cryptée

- 3 : **succès** : la séquence cryptée reçue et celle calculée localement sont identiques
- 4 : **échec** (retransmission nécessaire)

RADIUS (*Remote Auth. Dial-In User Service*, RFC 2865)

Centralisation des informations concernant un utilisateur :

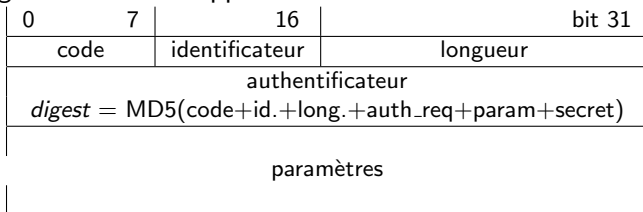
- fonctions AAA : *Authentication, Authorization, et Accounting*
 - vérification de l'identité
 - connaître les droits et configuration d'accès
 - suivre les actions de l'utilisateur
- modèle client/serveur
 - client peut se connecter aux différents points d'accès d'un FAI
 - client : point d'accès au FAI (extrémité PPP, ou autre proto.)
 - serveur : supporte une base de données utilisateurs du FAI



RADIUS : message

Service sans connexion (**UDP port 1812**)

- fiabilité gérée au niveau applicatif



- format :
- échange typique :
 - message Access-Request du client d'accès
 - nom de l'utilisateur, mot de passe crypté
 - adresse IP du point d'accès, port UDP
 - type de session (PPP, rlogin, telnet...)
 - réponse Access-Accept du serveur RADIUS
 - liste d'attributs à utiliser pour la session (adresse, serveurs...)
 - réponse Access-Reject du serveur RADIUS
 - l'utilisateur n'est pas dans la base ou pas d'accès au service

NCP (*Network Control Protocol*)

Après la configuration de la liaison (LCP) et une authentification optionnelle (PAP ou CHAP), **configuration des protocoles de couche 3**

- un NCP par protocole transporté :
 - IPCP pour la configuration IPv4 (RFC 1332)
 - IPV6CP pour la configuration IPv6 (RFC 2472)
 - ATPC pour la configuration AppleTalk (RFC 1378)
 - IPXCP pour la configuration IPX (RFC 1552)
 - OSINLCP pour la configuration des protocoles de l'OSI (RFC 1377)
 - ...

IPCP (*Internet Protocol Control Protocol*)

- champ protocol de la trame PPP : 0x8021
- 4 types de trames de négociation (Configure-Request, Configure-Ack, Configure-Nak ou Configure-Reject)
- format identique à LCP, valeur du champ code :
 - 2 : **compression d'entête**
 - 2 octets pour le type de compression (0x002d pour **Van Jacobson**; 0x0061 pour **étendu**, RFC 2507; 0x0003 pour **ROHC**, *RObust Header Compression*, RFC 3241)
 - 1 octet pour le nombre max de connexions compressées
 - 1 octet pour indiquer la présence du numéro de connexion
 - 3 : **adresse IP** du client sur 4 octets
 - 4 : **adresse IP permanente** (*home address*)
 - 129 : adresse IP du **serveur DNS primaire**
 - 130 : adresse IP du **serveur NBNS primaire**
 - 131 : adresse IP du **serveur DNS secondaire**
 - 132 : adresse IP du **serveur NBNS secondaire**

Compression d'entête TCP/IP

PPP doit être efficace sur les liaisons à bas débit

- connexion TCP/IP interactive (telnet...)
 - algorithme de Nagle
 - taille importante des entêtes
 - exemple :

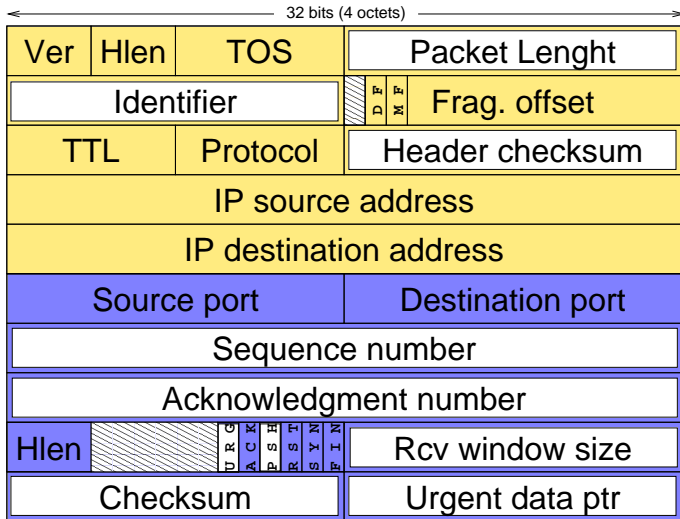
trame 1 (A->B)

0000																15 00
0010	00 29	b5 8e	40 00	40 06	0f 78	84 e3	3d 7a	cb 10								
0020	ea 14	81 cf	00 15	52 40	18 64	52 65	10 0d	50 18								
0030	ff ff	bb 7b	00 00	64												

trame 2 (A->B)

0000																45 00
0010	00 28	b5 8f	40 00	40 06	0d be	84 e3	3d 7a	cb 10								
0020	ea 14	81 cf	00 15	52 40	18 65	52 65	10 0e	50 10								
0030	ff ff	aa 5f	00 00													

Différences entre deux segments



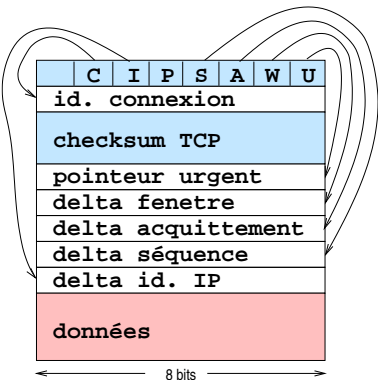
Algorithme de Van Jacobson

Algorithme de compression des entêtes TCP/IP (RFC 1144)

- émission des entêtes classiques pour SYN, RST et FIN (champ protocol à 0x0021)
- puis compression :
 - envoi complet avec l'**identificateur** de connexion (0x002F) :
 - pour la synchronisation (premier paquet complet)
 - pour les valeurs négatives d'acquit. ou de séquence (erreur)
 - **différentiel** entre deux entêtes (0x002D) :
 - identificateur de connexion
 - maintien d'un **contexte** à chaque extrémitée
 - seuls les champs modifiés sont transmis
 - la différence est généralement codée sur un octet



Entête IP compressé

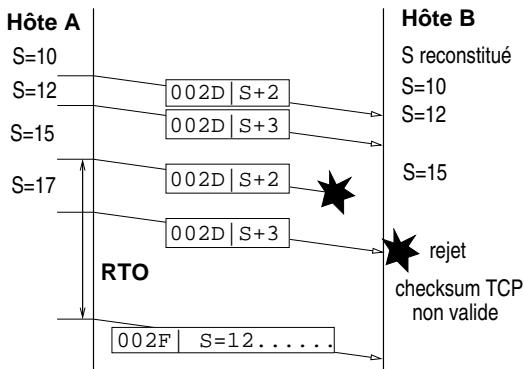


Seul le 1^{er} octet et le
checksum TCP sont
obligatoires (30. mini.)

- présence des champs dans le 1^{er} octet :
 - bit C : présence id. connexion.
 - non émis si idem précédent
 - bit U : recopie
 - bit W : delta fenetre
 - négatif en complément à 2
 - bits S/A : delta seq./acq.
 - pas de négatifs
 - bit I : delta id. IP
 - absent = +1
 - bit P : recopie bit PUSH TCP
- les delta sont codés sur 1 à 2 o.
 - 1 octet : 0x01 à 0xFF
 - 3 o. : 0x000100 à 0x00FFFF
- checksum TCP : recopie

Détection d'erreur

Validation de la reconstitution grâce au checksum TCP :



ARES : plan du cours 5/5

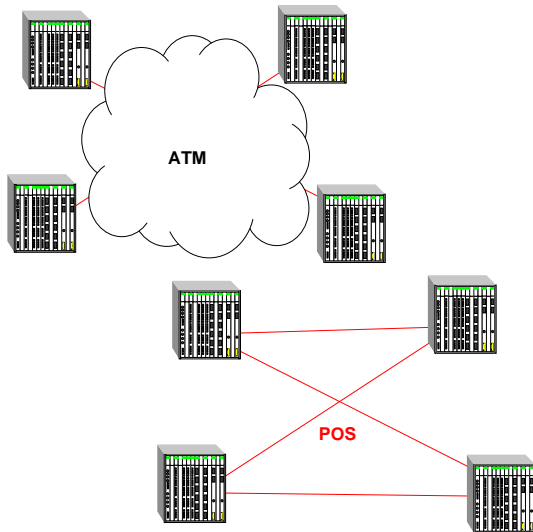
- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

POS (*Packet Over SONET*)

PPP Over SONET/SDH (RFC 2615)

- PPP initialement pour les liaisons RTC à faible débit
- aussi adapté aux **liaisons à haut débit** du monde télécom
 - hiérarchies des multiplexes SONET/SDH
 - OC-3c/STM-1 (155 Mbps)
 - OC-12c/STM-4c (622 Mbps)
 - OC-48c/STM-16c (2.5 Gbps)
 - OC-192c/STM-64c (10 Gbps)
 - OC-768c/STM-256c (40 Gbps)
 - PPP sur liaisons synchrones basées sur des octets
 - ~ connexions série orientée octet
- but : se rapprocher de la fibre
 - POS simplifie l'approche IP/ATM/SONET
 - MPLS/POS plus souple (*Traffic Eng.*)

POS (2)



PPPoA (*PPP Over ATM/AAL5*, RFC 2364)

Réseaux de collecte des opérateurs télécom généralement ATM

- Utilisation des connexions ATM **AAL 5**
 - plus de *framing* HDLC
 - adaptation au trames CPCS PDU AAL 5
 - *padding* (multiples de 48 octets)
- deux encapsulations RFC 1483 :
 - *VC-multiplexed PPP*
 - les extrémités savent qu'elles transportent du PPP
 - *LLC encapsulated PPP*
 - identification du protocole pour chaque PDU

PPPoA : encapsulations

VCMUX

Protocol Identifier (8 or 16 bits)	
...	
PPP information field	PPP payload
...	
PAD (0 - 47 bytes)	
CPCS-UU (1 byte)	CPCS-PDU Trailer
CPI (1 byte)	
Length (2 bytes)	
CRC (4 bytes)	

SNAP/LLC

Destination SAP (0xFE)	LLC header
Source SAP (0xFE)	
Frame Type = UI (0x03)	
NLPID = PPP (0xCF)	
Protocol Identifier (8 or 16 bits)	
...	
PPP information field	PPP payload
...	
PAD (0 - 47 bytes)	
CPCS-UU (1 byte)	CPCS-PDU Trailer
CPI (1 byte)	
Length (2 bytes)	
CRC (4 bytes)	

PPPoA : remarques

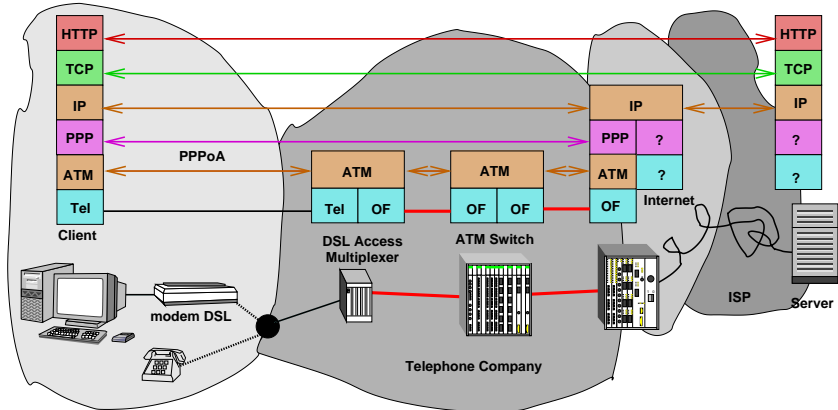
Avantages :

- dissociates the ADSL/ATM provider from the ISP
- per-session **authentication** (PAP and CHAP)
- user supervision (**RADIUS**)
 - per-session billing of users
 - overbooking and timed disconnections
- attribution of **an IP address** to the client
- **securing** access without ATM-level management
 - ATM signaling too complex : use of PVC
 - VPNs handled by PPP tunnels (no end-to-end PVC)
- **adaptable** to network evolution
 - aggregation routers (high density of PPP terminations)

Disadvantages :

- one connection per PVC
- overall complexity of the solution (IP, PPP, AAA, ATM...)
- 1 IP address ➡ NAT limits the applications

PPPoA sur ADSL



PPPoE (*PPP Over Ethernet*, RFC 2516)

Faire du point-à-point sur un support partagé :

- Ethernet dispose d'autoconfiguration : ARP, DHCP...
- ... mais pas de prise en charge à distance, ni de AAA

Mise en place d'une connexion point-à-point sur Ethernet :

- valeurs Ethertype
 - 0x8863 pour les **trames de découverte**
 - 0x8864 pour les **trames de données**
- format du payload de ces trames Ethernet :

0	4	7	16	bit 31
Ver	Type	Code	Session_id	
Length			PPPoE payload...	

- Ver et Type = 0x01
- Code = 0x00 (données) et ... (découverte)
- Session_id = identification d'un flux (avec l'@ MAC)
- Length = taille des données (élimination du bourrage)

PPPoE : messages de découverte

Encapsulé dans des trames PPPoE (Ethertype = 0x8863)

- champ Code :

- 0x09 : PADI (*PPPoE Active Discovery Initiation*) ➡ diffusion
- 0x07 : PADO (*PPPoE Active Discovery Offer*) ➡ proposition (avec Session_id)
- 0x19 : PADR (*PPPoE Active Discovery Request*) ➡ selection
- 0x65 : PADS (*PPPoE Active Discovery Session-confirmation*)
- 0xA7 : PADT (*PPPoE Active Discovery Terminate*)

- champ PPPoE payload (TLV avec caractères codées UTF-8) :

0	16	bit 31
Tag_type		Tag_length
Tag_value ...		

- nom du FAI, nom du concentrateur d'accès, identificateur de session, *cookie* de validation, nature d'une erreur...

PPPoE : remarques

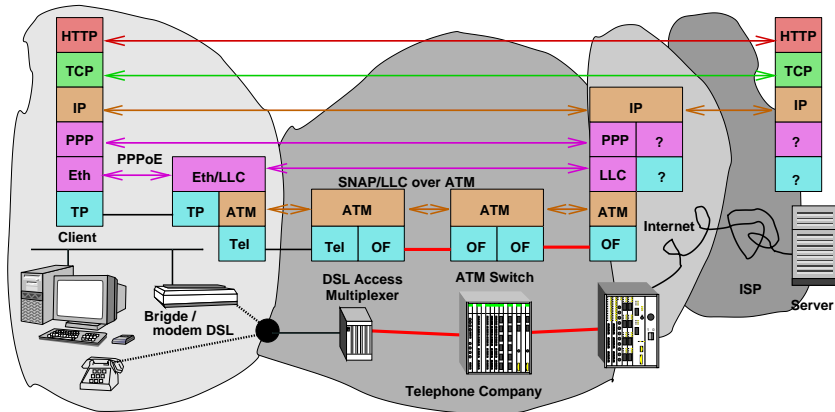
Avantages :

- similaires à ceux de PPPoA
- **authentification** par session (PAP et CHAP)
 - dans un réseau de type LAN
- surveillance des utilisateurs (**RADIUS**)
 - facturation des utilisateurs à la session
 - sur-réservation et déconnexions temporisées
- utilisateurs sans accès direct à ATM (**pontage**)
- plusieurs connexions par PVC
- attribution d'**une adresse IP** au client
 - préserve le modèle point-à-point sur un médium partagé

Inconvénients :

- technologie LAN, sujet au raffales de **broadcast**
- complexité de la solution (IP, PPP, AAA, ATM, LAN...)
- 1 adresse IP ➡ NPAT limite toujours les applications

PPPoE sur ADSL



Tunnels PPP

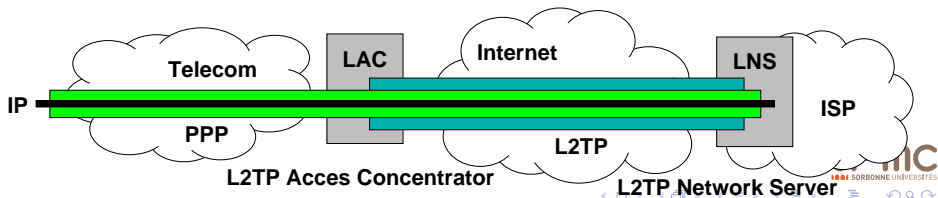
Relayer les trames PPP

- L2F (*Layer 2 Forwarding*)
 - propriétaire Cisco, Northern Telecom et Shiva
 - à partir d'une *Home Gateway* vers un *Network Access Server*
- PPTP (*Point-to-Point Tunneling Protocol*)
 - propriétaire Microsoft, 3Com, Ascend, US Robotics et ECI Telematics
 - à partir d'un concentrateur vers un serveur d'accès (logiciel)
- L2TP (*Layer 2 Tunneling Protocol*)
 - standard IETF

L2TP : architecture

Exemple : l'accès ADSL,

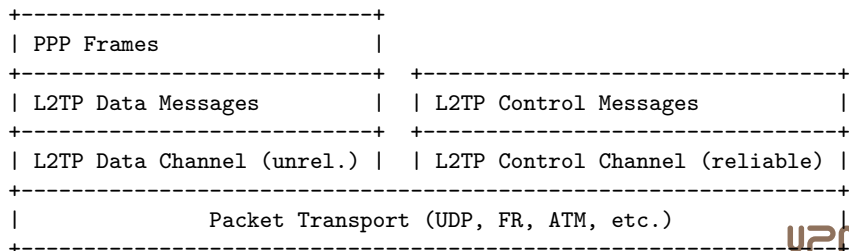
- le fournisseur d'accès ADSL (FAA) gère la liaison jusqu'à un concentrateur d'accès (CA)
- comment atteindre le fournisseur de service Internet (FAI) ?
 - CA chez le FAI (au service d'un seul FAI)
 - le FAA gère la configuration IP (délégation du FAI)
 - le FAI à un accès à chaque CA (trop lourd)
 - création d'un tunnel du CA vers le FAI
 - relayage de PPP à travers le réseau entre le FAA et le FAI



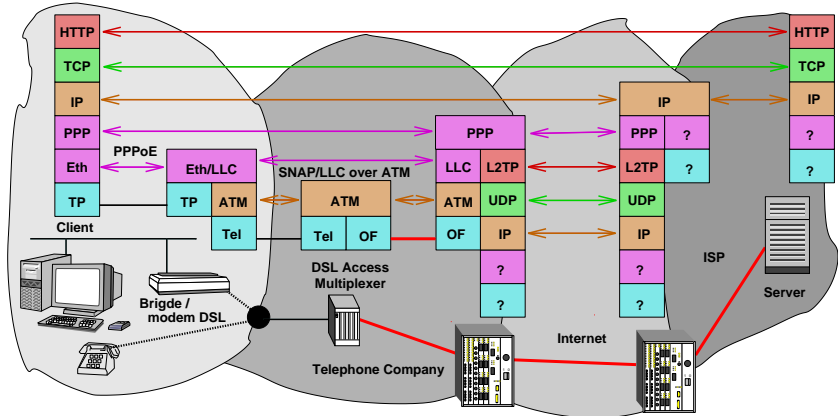
L2TP (*Layer 2 Tunneling Protocol*, RFC 2661)

2 canaux de communication :

- Canal de contrôle : échange de messages de contrôle du tunnel avec un protocole fiable et avec contrôle de flux
- Canal de données : trames PPP encapsulées dans un message L2TP non fiable et non sécurisé
 - réseaux télécom (ATM, FR...)
 - Internet (UDP **port 1702**)



ADSL et L2TP



VPN (*Virtual Private Network*)

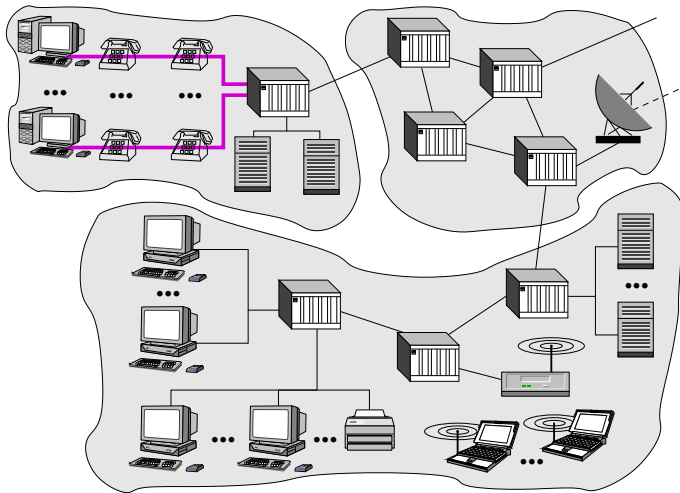
Liaison virtuelles entre plusieurs entités.

- réseaux privés peu coûteux (infrastructure mutualisée)
 - généralement Internet
 - peut transporter d'autres protocoles
 - peut concaténer plusieurs technologies (ATM-TCP/IP...)
- basé sur des tunnels entre différentes extrémités :
 - point d'accès à un réseau
 - machine isolée
- sécurisation
 - IPSEC ➡ U.E. **ING**

ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

Boucle locale : où ?



ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

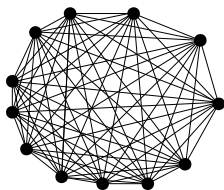
Le système téléphonique

Réseau Téléphonique Commuté (RTC)
Public Switched Telephone Network (PSTN)
Plain Old Telephone System (POTS)

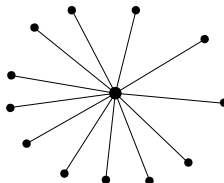
- Buts :
 - transmission de la parole humaine
 - $\sim 300 \text{ Hz} - 3400 \text{ Hz}$
 - étendue mondiale
 - service analogique
- Extensions (disponibilité limitée) :
 - service numérique
 - transmission de données entre les réseaux informatiques
 - LS, X25, FR, ATM...
 - débits jusqu'au Gigabit/s

Architecture du réseau téléphonique

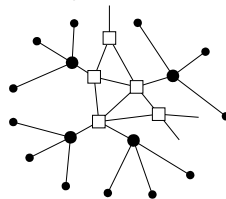
pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*



(a)



(b)



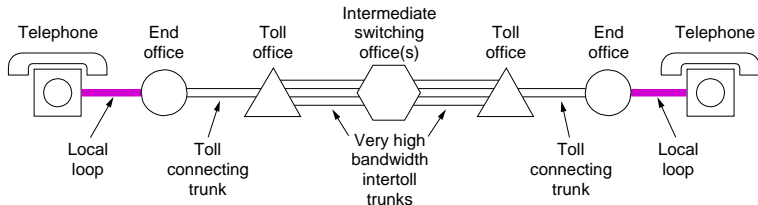
(c)

Réseau à interconnexion totale (a), à commutateur central (b) et hiérarchique à deux niveaux (c)

Structuration du réseau téléphonique

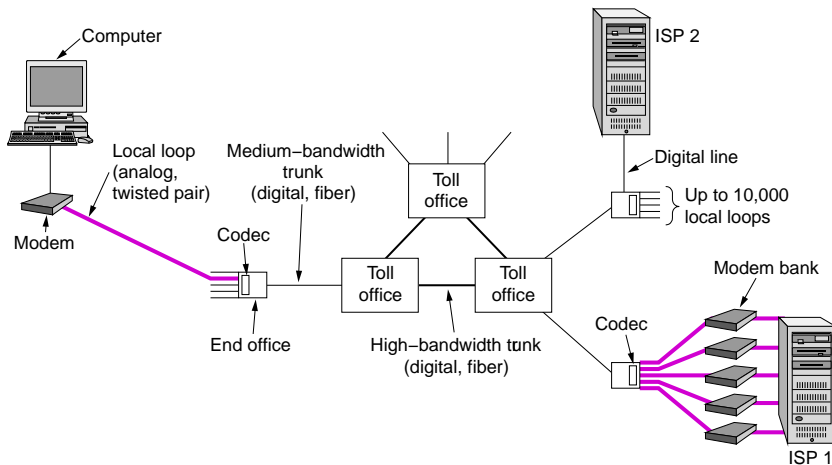
- hiérarchie multi-niveaux (jusqu'à 5)
 - composants de base :
 - liaisons abonnés-centraux
 - centraux
 - liaisons inter-centraux

Cheminement d'une connexion téléphonique



- **Commutateur Local** (CL, *end office*)
 - accès téléphones par la **Boucle Locale** (BL, *local loop* ou desserte locale)
- **Commutateur à Autonomie d'Acheminement** (CAA, *toll office*)
 - reliés par des **lignes** ou artères interurbaines (*toll connecting trunks*), forme une ZAA (Zone à Autonomie d'Accès) : plusieurs par zones urbaines
- **Commutateurs de Transit** primaires/secondaires (CTP/CTS, *intermediate switching offices*)
 - reliés par des **artère** haut débit (*intertoll trunks*)

Boucle locale par le réseau téléphonique



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 3rd edition*

Modems classiques

Modulateur/démodulateur

- échange **full duplex**
- émission large bande (**analogique**)
 - utilisation d'une **porteuse** (1000-2000 Hz)
 - nombre de **modulations** par seconde (2400 bauds)
 - modulation d'amplitude (AM, *Amplitude Modulation*)
 - modulation de phase (PSK, *Phase Shift Keying*)
 - modulation de fréquence (FSK, *Frequency Shift Keying*)
 - combinaisons : modulation avec codage en treillis...
 - théorème de **Shannon** : limite théorique = $H * \log_2(1 + S/N)$ bit/s
 - avec : H bande passante, S/N de rapport signal/bruit
 - téléphone : $S/N \sim 30$ dB \Rightarrow limite ~ 35 kbit/s
 - théorème de **Nyquist** : débit binaire max = $2H * \log_2 V$ bit/s
 - V.32bis : $\log_2 V = 6 \Rightarrow 14.4$ kbit/s
 - V.34 : $\log_2 V = 12 \Rightarrow 28.8$ kbit/s
 - V.34bis : $\log_2 V = 14 \Rightarrow 33.6$ kbit/s

Modems 56K

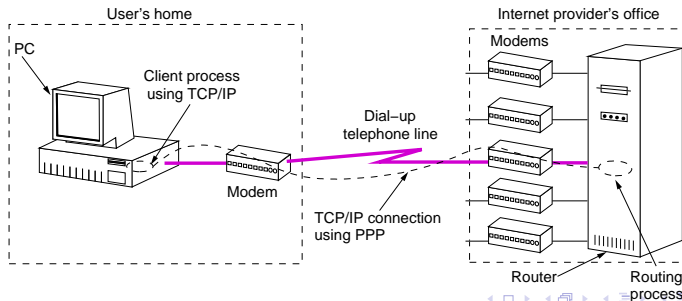
Dépasser la limite de Nyquist ?

- accès direct au numérique chez l'ISP (précédemment : ISP2)
 - une seule double conversion (moins de bruits introduits)
 - récupération de 70 kbit/s théorique
 - Nyquist avec la bande passante numérique :
 - 4 kHz = 8000 bauds
 - nombre de bits par échantillons :
 - Europe : 8 bits ➡ 64 kbit/s
 - US : **7 bits ➡ 56 kbit/s**
 - normes :
 - V.90 ➡ 56 kbit/s descendant et 33.6 kbit/s montant
 - V.92 ➡ 56 kbit/s descendant et 48 kbit/s montant

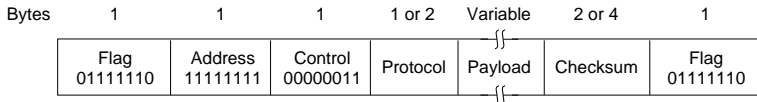
IP sur RTC

Service offert par les modems sur RTC

- **couche physique :**
 - asynchrone orienté **octet**
- **couche liaison :**
 - SLIP
 - CSLIP
 - PPP



PPP sur RTC



Encapsulation PPP sur un support orienté **octets** :

- Similaire à une trame **HDLC**

- fanion de valeur (1 octet) : 0x7E
- address (1 octet) : 0xFF
- control (1 octet) : 0x03
- protocol (1 ou 2 octet)
 - optimisation : suppression des champs address et control, réduction de protocol et compression des entêtes TCP/IP
- protection par échappement (octet de valeur 0x7D) :
 - fanion = 0x7E ➡ 0x7D 0x5E et 0x7D ➡ 0x7D 0x5D
- valeurs actives pour la gestion du modems (codes ASCII < 32)
 - 0x11 (XON) ➡ 0x7D 0x31 et 0x13 (XOFF) ➡ 0x7D 0x33

➡ La bande passante disponible est **variable** !

Evolution de la boucle locale téléphonique

La paire torsadée est limitée artificiellement

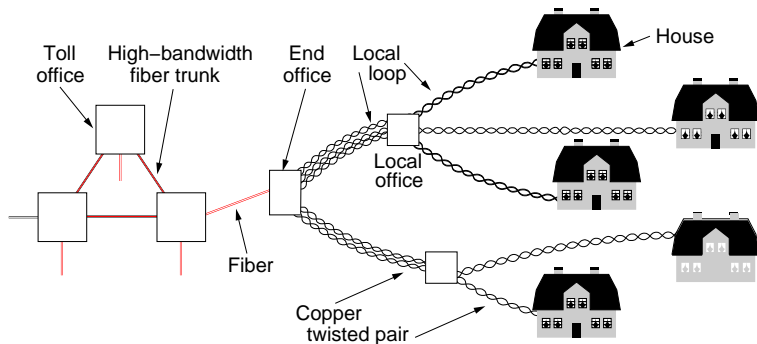
- optimisée pour la voix
 - filtrage dès le commutateur local :
 - \sim filtre passe-bande 300Hz — 3400Hz
 - les modems sont forcément lents !
 - fin '90, les autres techno. de boucle locale sont à plusieurs Mbit/s

➡ *Digital Subscriber Line*

- utilisation de paire torsadée à sa limite physique
 - dépasse le MHz
 - plusieurs Mbit/s (selon la longueur, l'épaisseur et la qualité)
 - contraintes de conception :
 - ne pas gêner les services existants (Voix et RNIS)
 - accès permanent
 - fonctionner sur une paire UTP3...

Structure du réseau RTC

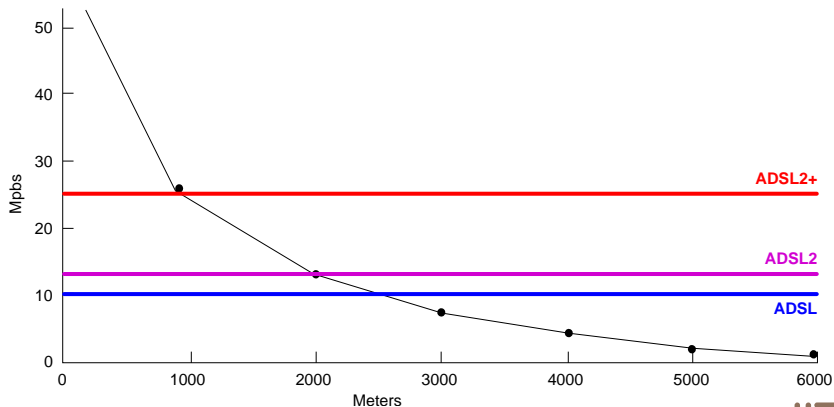
Paire torsadée du commutateur local à la prise téléphonique



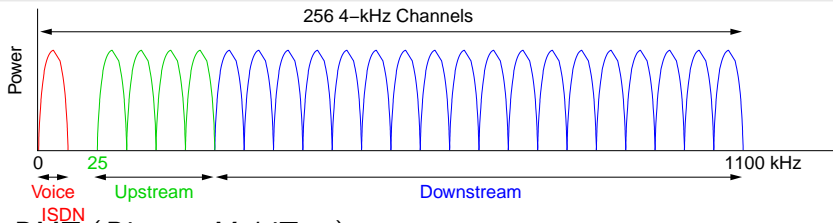
Possibilité d'armoires de brassage intermédiaires (sous-répartiteurs)

Bande passante de la paire torsadée

Débit théorique d'une paire type UTP3



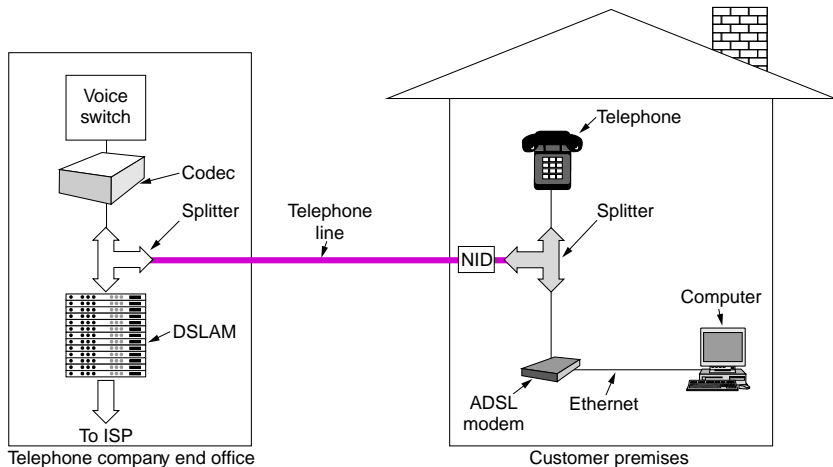
Partage du spectre fréquentiel



DMT (*Discrete MultiTone*)

- 256 canaux indépendants de 4312.5 Hz
 - 0 voix
 - 1-5 marge (limitation des interférences)
 - 6-(n) pour le flux montant (à partir de 26 kHz)
 - dont 1 pour le contrôle de flux montant
 - ($n + 1$)-255 pour le flux descendant
 - dont 1 pour le contrôle de flux descendant
- accès typiques (80% descendant et 20% montant) :
 - 256/64 kbit/s, **512/128 kbit/s**, 1024/256 kbit/s...

Configuration xDSL



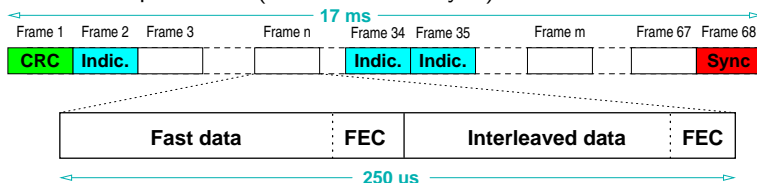
pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

Comparaison des technologies xDSL

nom	signification	mode de transmission	paires cuivre	débit descendant	débit montant	distance max
IDSL	<i>ISDN over DSL</i>	Symétrique (2B1Q)	1	128 kbit/s ou 144 kbit/s	128 kbit/s ou 144 kbit/s	3.6 km
HDSL	<i>High-Data-Rate DSL</i>	Symétrique (2B1Q/CAP)	2/3	1.5 Mbit/s ou 2 Mbit/s	1.5 Mbit/s ou 2 Mbit/s	3.6 km
SDSL	<i>Single-Line DSL</i>	Symétrique (2B1Q/CAP)	1	1.5 Mbit/s ou 2 Mbit/s	1.5 Mbit/s ou 2 Mbit/s	2.9 km
RADSL	<i>Rate-Adaptive DSL</i>	Asymétrique (CAP)	1	jusqu'à 7 Mbit/s	jusqu'à 1 Mbit/s	5.4 km (1.5 Mbit/s)
ADSL	<i>Asymmetric DSL</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 8 Mbit/s	jusqu'à 640 kbit/s	5.4 km (1.5 Mbit/s)
G.Lite	<i>ADSL splitterless</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 1.5 Mbit/s	jusqu'à 512 kbit/s	3.6 km
ADSL2 Annex J	<i>Evolution ADSL</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 12 Mbit/s	jusqu'à 3.5 Mbit/s	5.4 km
ADSL2 Annex L	<i>Extended Range ADSL2</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 12 Mbit/s	jusqu'à 1 Mbit/s	7 km
ADSL2+ Annex M	<i>Evolution ADSL2</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 24 Mbit/s	jusqu'à 3.5 Mbit/s	5.4 km
ADSL2+ Annex L	<i>Extended Range ADSL2+</i>	Asymétrique (DMT)	1	Jusqu'à 24 Mbit/s	jusqu'à 1 Mbit/s	7 km

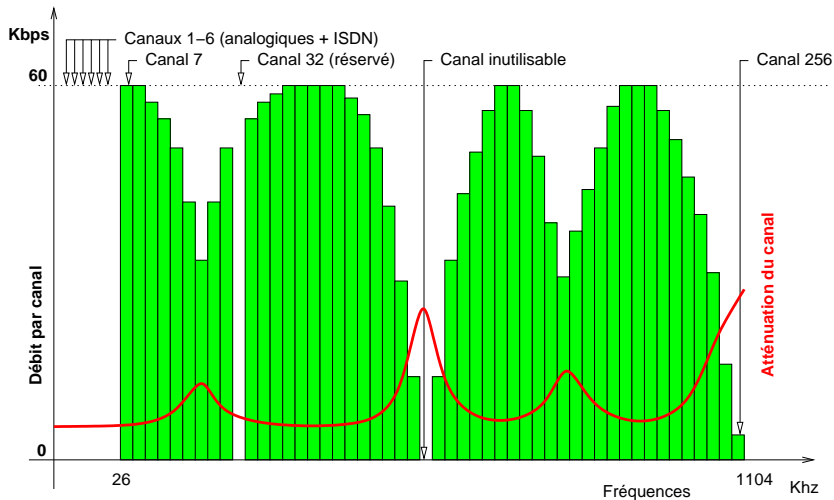
Technologie ADSL

- modulation DMT
 - chaque sous porteuse code 0 à 15 bits (valence) à 4000 Bauds
 - la valence dépend du S/B pour chaque canal
- format de trame (par canal)
 - 1 super trame (68 trames + 1 sync) toute les 17ms



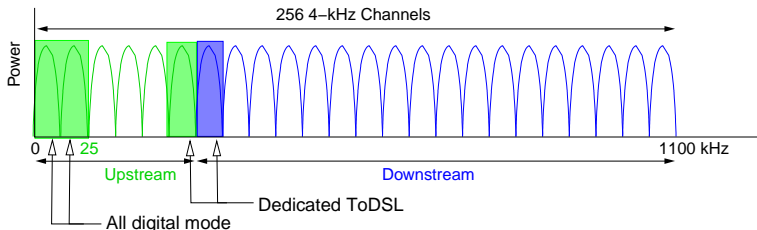
- une trame toute les 250μs avec réservation
- longueur de trame variable (valence)
- deux flux multiplexés alimentés par 2 tampons d'émission

Débit du lien ADSL



Quantité d'information par canal avec la modulation DTM

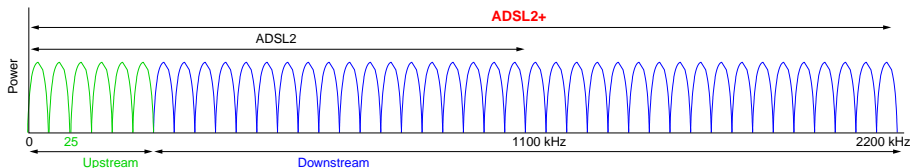
ADSL2



Evolutions ADSL (G.992.3 et G.992.4)

- augmentation de la portée et du débit en longue distance
 - amélioration du codage
 - réduction de l'*overhead*
 - récupération des canaux analogiques (⇒ *All digital mode*)
- économie d'énergie (mode veille dynamique)
- *bonding* : couplage de plusieurs lignes (mux. inverse ATM)
- création de canaux dédiés (⇒ ToDSL)
- support des services basés sur des trames (⇒ Ethernet)

ADSL2+



Evolutions ADSL2 (G.992.5)

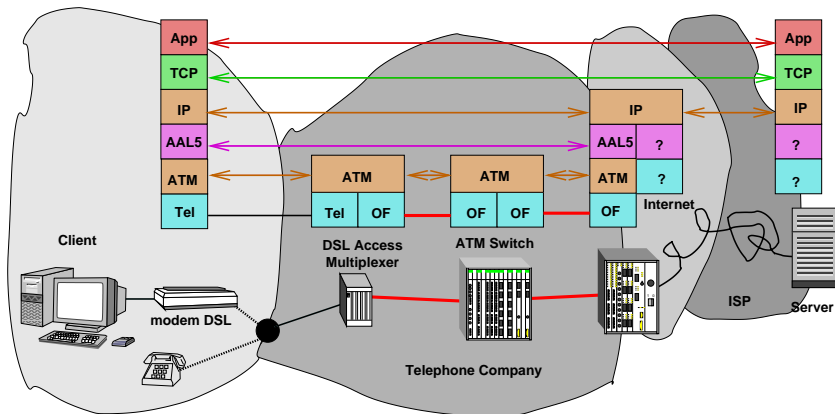
- utilisation d'une bande passante étendue (jusqu'à 2.2 MHz)
 - augmentation du débit pour les courtes distance ($l < 2500\text{m}$)
 - théoriquement $d > 20\text{ Mbit/s}$ en *download* si $l < 1000\text{m}$
- mode double bande passante en *upload* possible

IP sur ADSL

Encapsulation IP sur ADSL ?

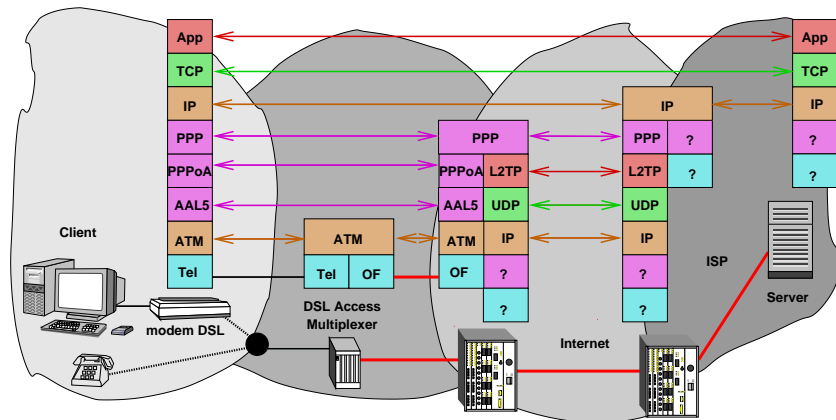
- ADSL est une technologie de la **couche physique**
 - ➡ une couche liaison est nécessaire
 - ATM ?
 - compatible avec les opérateurs télécom (actuels FAA)
 - **IP/AAL5/ATM/ADSL**
 - Ethernet ?
 - compatible avec les opérateurs internet (futurs FAA)
 - **IP/Ethernet/ADSL**
 - PPP ?
 - AAA avec Radius
 - **PPPoA/AAL5/ATM/ADSL**
 - **PPPoE/Ethernet/AAL5/ATM/ADSL**
 - **PPPoE/Ethernet/ADSL**
 - **PPP/ADSL**, avec MPLS pour le TE

ATM sur ADSL

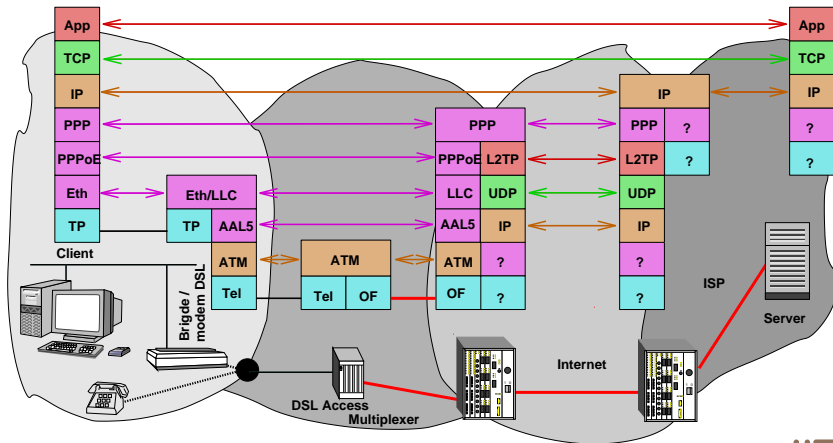


➡ les cellules sont multiplexées dans les deux flux ADSL

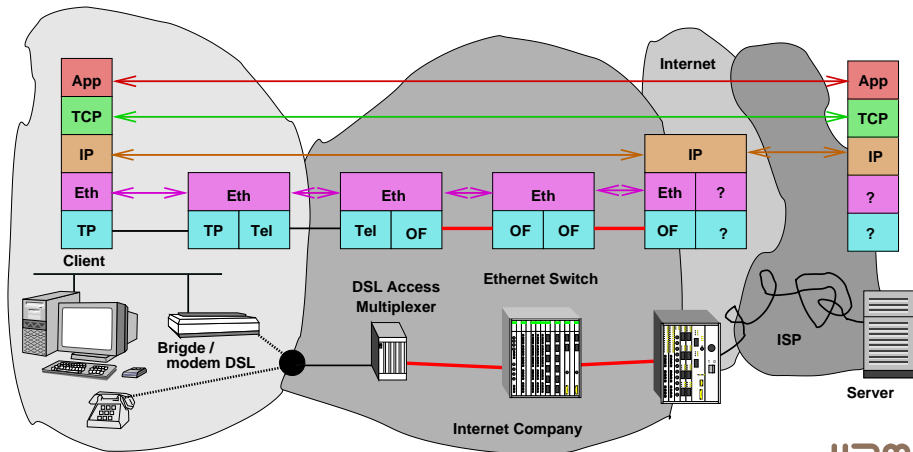
PPPoA sur ADSL



PPPoE sur ADSL



Ethernet sur ADSL2



VDSL

Plus rapide que l'ADSL...

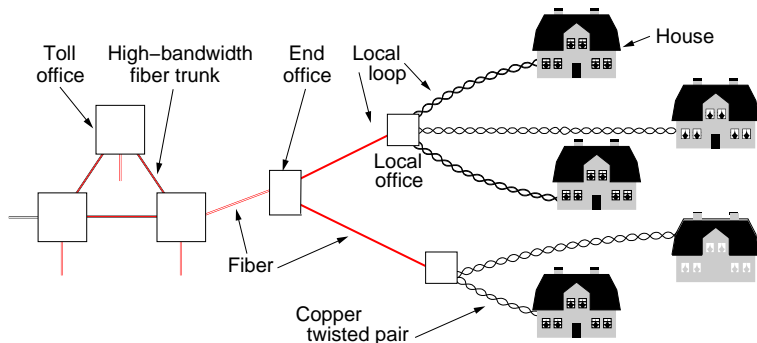
nom	signification	mode de transmission	paires cuivre	débit descendant	débit montant	distance max
ADSL	<i>Asymmetric DSL</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 8 Mbit/s	jusqu'à 640 kbit/s	5.4 km (1.5 Mbit/s)
ADSL2 Annex J	<i>Evolution ADSL</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 12 Mbit/s	jusqu'à 3.5 Mbit/s	5.4 km
ADSL2+ Annex M	<i>Evolution ADSL2</i>	Asymétrique (DMT)	1	jusqu'à 24 Mbit/s	jusqu'à 3.5 Mbit/s	5.4 km
VDSL	<i>Very-High-Rate DSL</i>	Asymétrique (CAP/DMT)	1	jusqu'à 53 Mbit/s	jusqu'à 12 Mbit/s	1.5km (13 Mbit/s)
VDSL2	<i>Very-High-Rate DSL</i>	Asymétrique (CAP/DMT)	1	jusqu'à 250 Mbit/s	jusqu'à 12 Mbit/s	3.5km (13 Mbit/s)

... mais distances plus courtes !

- VDSL2 : 250 Mbit/s théorique à la source, 100 Mbit/s à 500 m
 - à plus d'1 km, ADSL2+ est intéressant
 - il faut être proche de la source
 - ➡ FTTN (*Fiber To The Neighborhood*)

FITL (FTTN)

Fiber In The Loop (Fiber To The Neighborhood)



Distribution locale hybride (fibre optique jusqu'au sous-répartiteur)

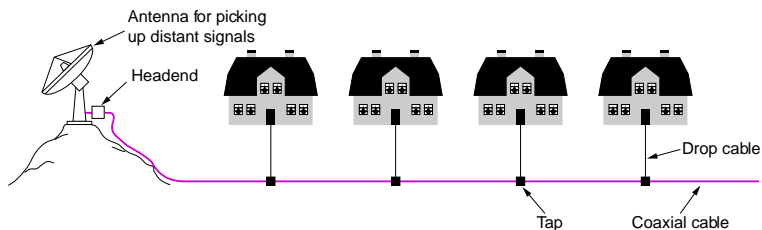
⚡ attention à l'intégration des DSLAM...

sinon FTTH (*Fiber To The Home*)

ARES : plan du cours 5/5

- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - **Technologies à support partagé**
 - Autres technologies

Réseau câblé avec antenne collective



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

CATV (*Community Antenna TeleVision*)

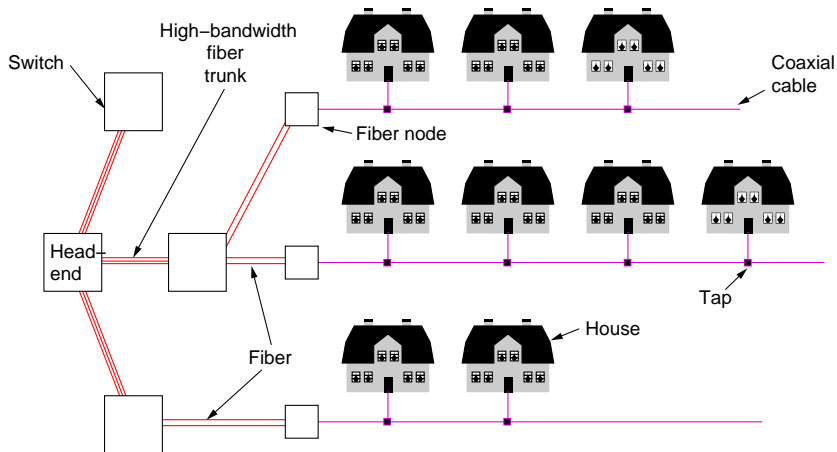
- distribution de la télévision sur câble coaxial 75Ω
 - relai de la télévision hertzienne/satellitaire
- évolution ('70)
 - contenu spécifique
 - câblo-opérateurs
 - interconnexion des désertes locales : **réseau longue distance**

Réseau de distribution hybride

HFC (*Hybrid Fiber Coax*)

- arbre de distribution
 - toujours une **tête de réseau** (*Head End*)
 - commutateurs optique/optique
 - centres de distribution optique/coax
- intégration de service
 - télévision
 - téléphonie
 - data
- médium **partagé**
 - jusqu'à 2000 utilisateurs par câbles
 - segmentation si les beaucoup d'utilisateurs data

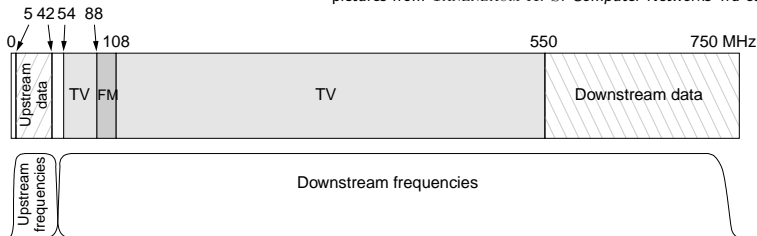
Structure du réseau câblé



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

Allocation des fréquences du câble

pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*



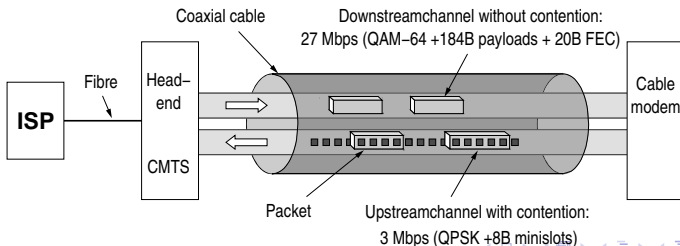
Récupération de fréquences autour de la vidéo :

- vidéo (+ radio 87–108 MHz)
 - 65–550 MHz (EU), 54–550 MHz(US)
 - largeur canal TV = 8 MHz (PAL/SECAM), 6 MHz (NTSC)
- bande passante **données montantes**
 - 5-65 MHz (EU), 5-42 MHz(US)
- bande passante **données descendantes**
 - 550–850 MHz (EU), 550–750 MHz(US)

Modem-câble (1)

Modulation numérique, pour augmenter les performances du coax.

- débit montant
 - modulation QPSK/QAM-16 sur des canaux de 2 MHz
 - 3 Mbit/s **partagé** par canal (~ 90 Mbit/s agrégé)
- débit descendant
 - modulation QAM-64/QAM-256 sur des canaux de 6/8 MHz
 - 27-56 Mbit/s par canal (~ 1 -2 Gbit/s agrégé)



Modem-câble (2)

- contrôle par la tête de réseau (CMTS : *Cable Modem Termination System*)
 - signalisation dans des canaux dédiés
 - auto-configuration
 - allocation **dynamique** des canaux montants et descendants
 - mesure de distance (*ranging*) pour se **synchroniser**
- partage du canal montant
 - **minislot** (dépend du réseau ~ 8 octets)
 - contrôle d'accès type **ALOHA discrétisé**
 - détection de collision avec **BEB** (*Binary Exponential Backoff*)
- contrôle du canal descendant
 - émetteur **unique** (CMTS)
 - paquet de 204 octets (FEC sur 20 bits : correction de 6 bits)

➡ paramètres optimisés pour la transmission de flux MPEG 2

IP sur câble

Encapsulation IP sur câble ?

- le câble est associé à la **couche physique**
 - ➡ une couche liaison est nécessaire
 - protocoles propriétaire ?
 - nombreux mais abandonnés pour faire baisser les prix
 - IEEE 802.2 (SNAP/LLC) ?
 - compatible avec DOCSIS (US), EuroDOCSIS
 - **IP/LLC/câble**
 - auto-configuration : DHCP (approche LAN)
 - ATM ?
 - compatible avec DVB/DAVIC, EuroDOCSIS
 - **IP/ATM/câble**
 - auto-configuration : PPP (approche télécom)



support partagé ➡ cryptographie

Comparaison câble/ADSL

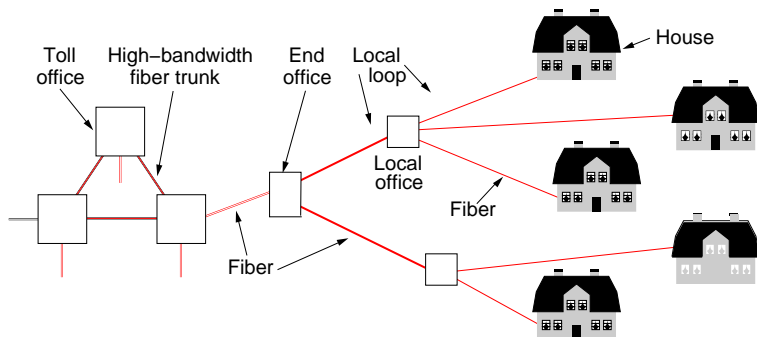
Lequel choisir ?

- similitudes :
 - réseau fédérateur en fibre optique
- avantages du câble :
 - bande passante 850 MHz
 - partagé avec la télévision et les autres utilisateurs
 - longue distance
 - encapsulation plus simple, mais cryptage
- avantages de l'ADSL :
 - bande passante 1.1 MHz
 - support dédié (avec la voix)
 - alimentation téléphonique autonome
 - débit déterministe

➡ Services comparables (et souvent disponible aux mêmes endroits)

FTTH

Fiber To The Home



Distribution optique jusqu'aux clients avec des éléments optiques intermédiaires passifs (*Optical splitters*)

PON (1) : Architecture

Déserte résidentielle optique

- topologie **point-à-multipoint**
 - réduction de la quantité de fibre utilisée
- terminologie : un **PON** (*Passive Optical network*) est constitué :
 - **OLT** (*Optical Line Termination*)
 - = tête de réseau HFC
 - **ONU** (*Optical Network Units*)
 - éléments optiques intermédiaires passifs
 - **ONT** (*Optical Network Terminals*)
 - permet de servir typiquement 32 à 128 clients
 - distance OLT-ONT jusqu'à 20 km
 - *extended reach* jusqu'à 135 km

PON (2) : Multiplexage

Support partagé

- WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) : 3 longueur d'ondes
 - 1.310 μm
 - flux montants combinés par **TDMA**
 - attribution des *slots* par l'OLT
 - 1.490 μm
 - flux descendants **diffusés**
 - cryptage nécessaire
 - 1.550 μm
 - réservé pour véhiculer un flux HFC (Câble)

PON (3) : normalisation

- **ITU** : *Broadband PON*
 - **APON/BPON** : *ATM/Broadband PON* (ITU-T G.983, 1998)
 - 32 ONT
 - asym. : *downstream* = 622 Mbit/s, *upstream* = 155 Mbit/s
 - **GPON** : *Gigabit Broadband PON* (ITU-T G.984, 2006)
 - 64 ONT
 - asym. : *downstream* = 2.5 Gbit/s, *upstream* = 1.25 Gbit/s
- **IEEE** : *Ethernet PON*
 - **GEAPON** : *Ethernet in the First Mile* (IEEE 802.3ah, 2005)
 - 32 ONT (interface d'accès *FastEthernet*)
 - sym. : *downstream* = 1.25 Gbit/s, *upstream* = 1.25 Gbit/s
 - **XEPON/10GEAPON** : *10Gigabit Ethernet PON* (IEEE 802.3v, 2009)
 - sym. (10/10G-EPON) *down* : 10 Gbit/s - *up* : 10 Gbit/s
 - asym. (10/1G-EPON) *down* : 10 Gbit/s - *up* : 1 Gbit/s

IP sur PON

Similaire au HFC et xDSL

- APON
 - IP/ATM
 - IP/PPPoA/ATM
- EPON
 - IP/Ethernet
 - IP/PPPoE/Ethernet

ARES : plan du cours 5/5

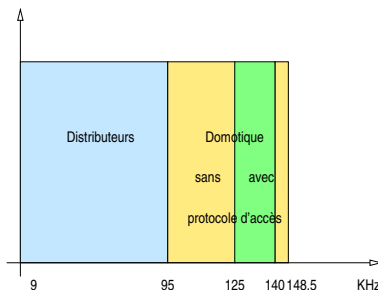
- 1 Architecture Ethernet
 - technologie
 - matériels
 - standardisation IEEE
- 2 Architecture point-à-point
 - HDLC
 - PPP : mécanismes de base
 - PPP : usages
- 3 De la boucle locale...
 - Point-à-point technologies
 - Technologies à support partagé
 - Autres technologies

Autre accès filaire

Il y a d'autres réseaux qui connectent les habitations

- eau ?
- gaz ?
- **électricité : Courant Porteurs en Ligne (CPL)**
 - signal hautes fréquences ajouté à l'onde 50 *Hz* qui véhicule l'énergie
 - modem avec filtre passe-haut
 - propagation
 - structure arborescente
 - atténuation avec la distance, la fréquence, la densité de branchement et la topologie du réseau
 - perturbation selon les types de charges, les filtres...
 - **cuivre non torsadé + hautes fréquences = antenne**

Allocation des fréquences CPL EN50065-1

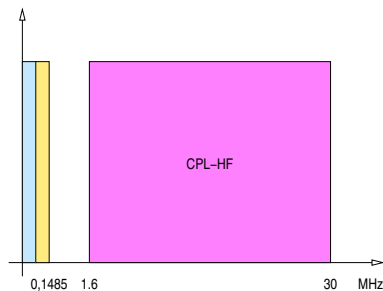


Utilisation des courants porteurs sur les réseaux de distribution

- 4 bandes définies :
 - 9–95 kHz : distributeur
 - 95–125 et 140–148.5 kHz : domotique sans protocole d'accès
 - 125–140 kHz : domotique avec protocole d'accès (data)

➡ **trop limitatif**

Allocation des fréquences CPL ETSI EP-PLT



- 1 bande haute fréquence définie :
 - 1.6–30 MHz
 - limites des perturbations rayonnées propres à chaque pays
- deux sous-bandes :
 - distribution (*access system*)
 - interne (*in-house system*)

Powerband

- comités de standardisation :
 - **Power Line Forum**
 - **Home Plug Alliance**
- normes pour le *in-house* (**HomePlug 1.1/AV/AV2**)
 - CSMA/CA avec modulation adaptative OFDM (AV/AV2)
 - turbocode pour la correction d'erreur (AV/AV2)
 - 14 Mbit/s (turbo : 85 Mbps, AV : 200 Mbps, AV2 : 600 Mbps)
 - sécurité avec AES 128bits
 - permet l'installation immédiate d'un LAN dans un bâtiment
- **HomePlug Access BPL** (*Broadband over Power Lines*)
 - jusqu'à qqs Mbit/s pour le modem résidentiel
 - jusqu'à 256 modems agrégés au niveau du transformateur
 - puis accès à Internet par un médium classique

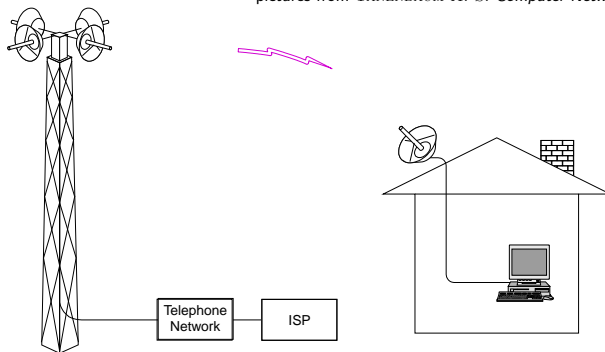
Boucle Locale Radio (BLR)

Wireless Local Loop (WLL)

- services visés
 - **haut débit**
 - similaire à l'ADSL et au câble
 - **pas de raccordement filaire**
 - antenne en hauteur (taille selon la technologie)
 - **usager statique**
 - sans-fil fixe (*fixed wireless*)
- deux anciennes technologies :
 - **MMDS** (*Multichannel Multipoint Distribution Service*)
 - micro-ondes, portée de 50 km
 - 33 canaux de 6 MHz dans la bande des 2.5 GHz
 - technologie silicium, économique mais bande passante limitée
 - **LMDS** (*Local Multipoint Distribution Service*)
 - ondes millimétriques, portée de 2 à 5 km
 - 3 GHz dans la bande des 40.5–43.5 GHz (29–32 GHz US)
 - technologie arsénure de gallium coûteuse

Architecture LMDS

pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*



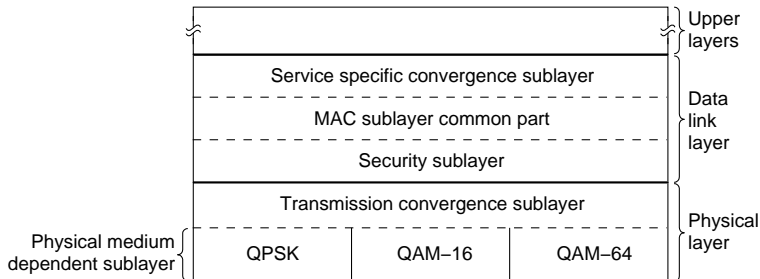
- antennes directionnelles (réutilisation de fréquences)
 - 36 Gbit/s par secteur
- liaison directe (sans obstacles) ➡ tours
 - perturbation par le mauvais temps

802.16 : WMAN (Wimax)

Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems

- communication sans fils haut débit
- technologie de boucle locale :
 - deserte d'immeuble (non mobile)
 - plusieurs ordinateurs fixes (réseau)
 - équipements mutualisés
 - potentiellement plus couteux que 802.11
 - duplex
 - longue distance : atténuations fortes, modulation OFDM
 - bande 2-11GHz, NLOS (*Non Line of sight*), portée de 1 à 5km (de 22 à 4,5Mbps)
 - bande 10-66GHz, LOS (*Line of sight*), portée de 7 à 15km (de 22 à 4,5Mbps)
 - accès multiples : cryptographie
 - gestion de la QoS : support audio/vidéo
- analogie :
 - 802.11 = réseau Ethernet sans fils
 - 802.16 = réseau CATV sans fil

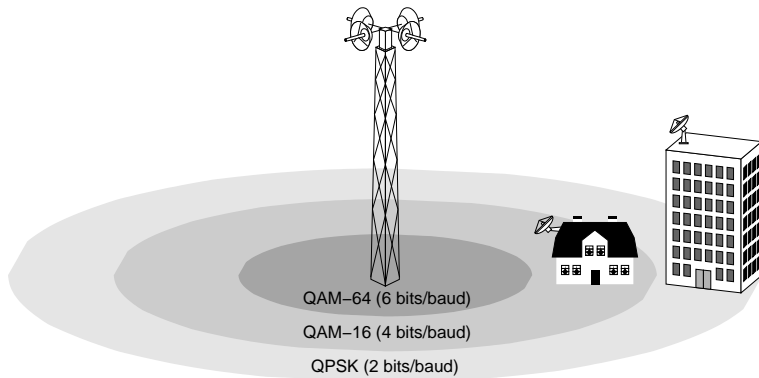
802.16 : Pile de protocoles



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

- approche 802 usuelle :
 - **couche liaison** (orienté connexion)
 - 3 sous-couches : LLC + MAC + sécurité
 - **couche physique**
 - adaptation au support et à la distance

802.16 : Couche physique



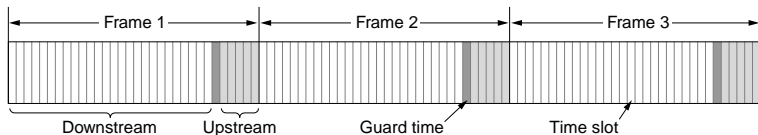
pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

- antennes directionnelles
 - multiples modulations, en fonction de la distance :
 - exemple avec un canal de 50 MHz, 300/200/100 Mbit/s

802.16 : Duplexage

Transmission full-duplex asymétrique

- **duplexage fréquentiel** (FDD : *Frequency Division Duplexing*)
 - approche classique symétrique (GSM, D-AMPS)
- **duplexage temporel** (FDD : *Time Division Duplexing*)
 - contrôle par la station de base
 - retournement pendant l'envoi d'une trame
 - temporisation de retournement



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

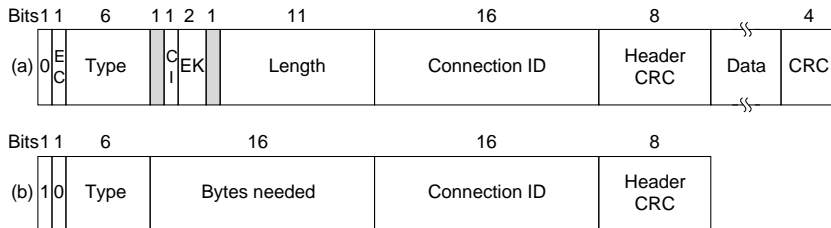
- correction d'erreur (codes de Hamming)
 - la moitié du trafic en redondance (~ CDRM)

802.16 : Sous-couche MAC

Service d'accès au médium en **mode connecté**

- chiffrement de la charge utile
- gestion des slots
 - allocation aux stations pour les flux montants
 - 4 classes de services
 - débit constant (CBR) : allocation systématique
 - débit variable en temps réel (RT-VBR) : interrogation
 - débit variable différé (NRT-VBR) : interrogation
 - au mieux (UBR) : CSMA+BEB

802.16 : Structure de trame



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

IP sur 802.16

Encapsulation IP sur 802.16 ?

- 802.16 est une technologie qui présente un service de couche liaison avec support :
 - couche réseau connectée : ATM
 - une connexion 802.16 par VC
 - couche réseau non-connectée : Ethernet, IP, PPP...
 - connexion 802.16 considéré comme un lien point-à-point

⇒ Complexe mais potentialité d'utiliser les extensions QoS d'IP.

Satellites : Introduction

Réflecteur dans l'espace

- répéteur de **micro-ondes**

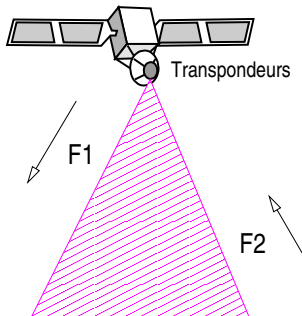
- plusieurs transpondeurs
 - amplification
 - transposition fréquentielle

- **couverture** terrestre
(faisceaux descendants)

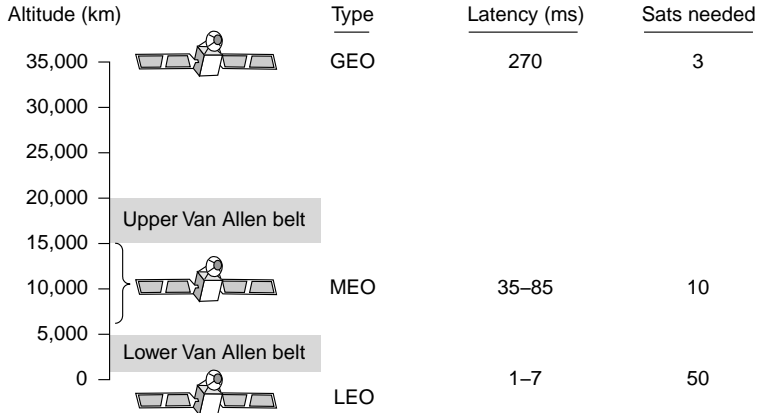
- larges (15000 km)
- étroits (100 km)

- **période** orbitale

- 3^e loi de Kepler : $P^2 = \alpha R^3$ (avec α constant)
 - **lune** (384000 km) : 28j
 - géostationnaire (35800 km) : 24h
 - proche de la terre : $\sim 1h30$



Satellites : 3 catégories



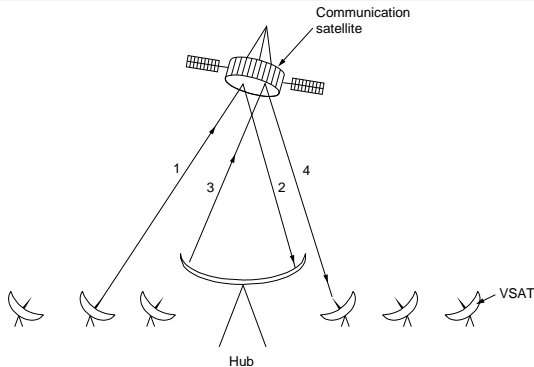
pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

Satellites : GEO

Geostationary Earth Orbit

- orbite géostationnaire : altitude 35800 km sur plan equatorial
 - un satellite tous les 2 degrés (180 satellites max)
 - 5 bandes de fréquence disponible
 - **L** : 1.5 GHz desc., 1.6 GHz mont., BP=15 MHz (encombrée)
 - **S** : 1.9 GHz desc., 2.2 GHz mont., BP=70 MHz (encombrée)
 - **C** : 4.0 GHz, 6.0 GHz, BP=500 MHz (interférences terrestres)
 - **Ku** : 11 GHz, 14 GHz, BP=500 MHz (absorbtion par la puie)
 - **Ka** : 20 GHz, 30 GHz, BP=3500 MHz (absorbtion par la puie, coût élevé)
 - plusieurs transpondeurs (+ 40)
 - 80 MHz chacun
 - gestion du multiplexage fréquentiel et temporel
 - télécom, vidéo et data
 - délais (propagation à la vitesse de la lumière $\sim 3\mu\text{s}/\text{km}$)
 - 270 ms de bout-en-bout ($RTT > 540 \text{ ms}$)

Satellites : Hub et microstations



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

- microstations terrestres **VSAT** (*Very Small Aperture Terminal*)

- antennes de moins d'1m (antenne GEO = 10m) sous 1w
 - débits : montant ➡ 1 Mbit/s et descendant ➡ 10 Mbit/s
 - délais : 540 ms de bout-en-bout entre 2 VSAT

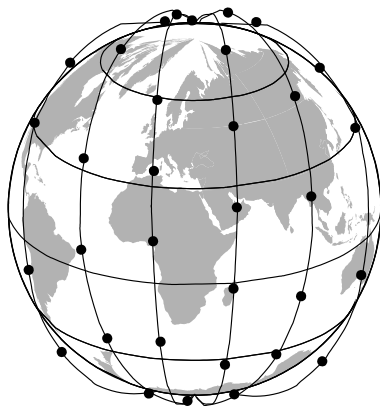
Satellites : MEO

Medium-Earth Orbit

- orbite : altitude entre 5000 km et 20000 km
 - entre les 2 ceintures de Van Allen
 - **besoin de les suivre dans le ciel**
- usage classique : système de positionnement par satellite
 - GPS (*Global Positioning System*)
 - GLONASS
 - GALILEO (2014)
 - 20 à 30 satellites
 - période : $\sim 6h$
 - altitude : ~ 18000 km
- usage data : **O3b (2012)**
 - 8 puis 16 satellites à 8000 km
 - bande **Ka**

Satellites : LEO – Couverture

Low-Earth Orbit



↗ 6 colliers Iridium

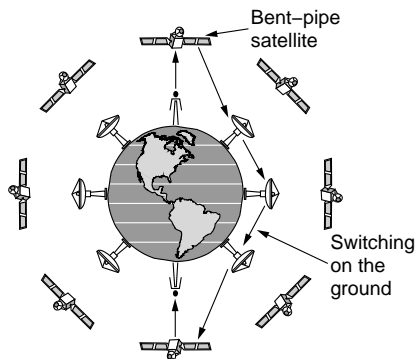
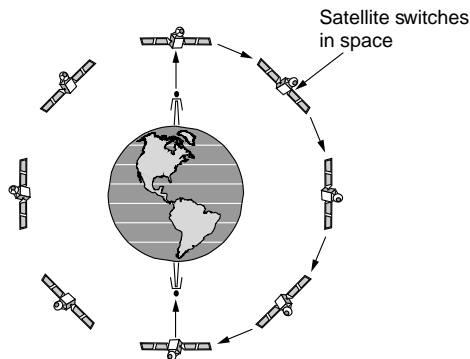
- **Iridium, Iridium Next (2016)**

- 66, 81 satellites à 750 km
 - 48 faisceaux spots /sat
 - ⇒ 1628 cellules terrestres
 - 3840 canaux /sat
 - ⇒ 253440 au total

- **Globalstar 1 et 2 (2010)**

- 48 satellites à 1414 km
 - simples répéteurs
 - puissance réduite

Satellites : LEO – Relayage



pictures from TANENBAUM A. S. *Computer Networks 4rd edition*

- Deux approches pour gérer les connexions/flux de données
 - commutation/routage **dans l'espace** ➡ Iridium, Teledesic
 - commutation/routage **sur terre** ➡ Globalstar

Satellites / Fibres optiques

Utilisations différentes

- **satellites**

- diffusion
- disponibilité géographique

- **fibres optiques**

- bande passante
- insensibilité aux perturbations