Communication et fonctionnement bas niveau - R2.04

Architecture des réseaux

TD

Michel Salomon

IUT de Belfort-Montbéliard
Département d'informatique

Transmission

- Qu'est-ce qu'un réseau informatique ?
- Modèle de communication en couches
- Canal de transmission

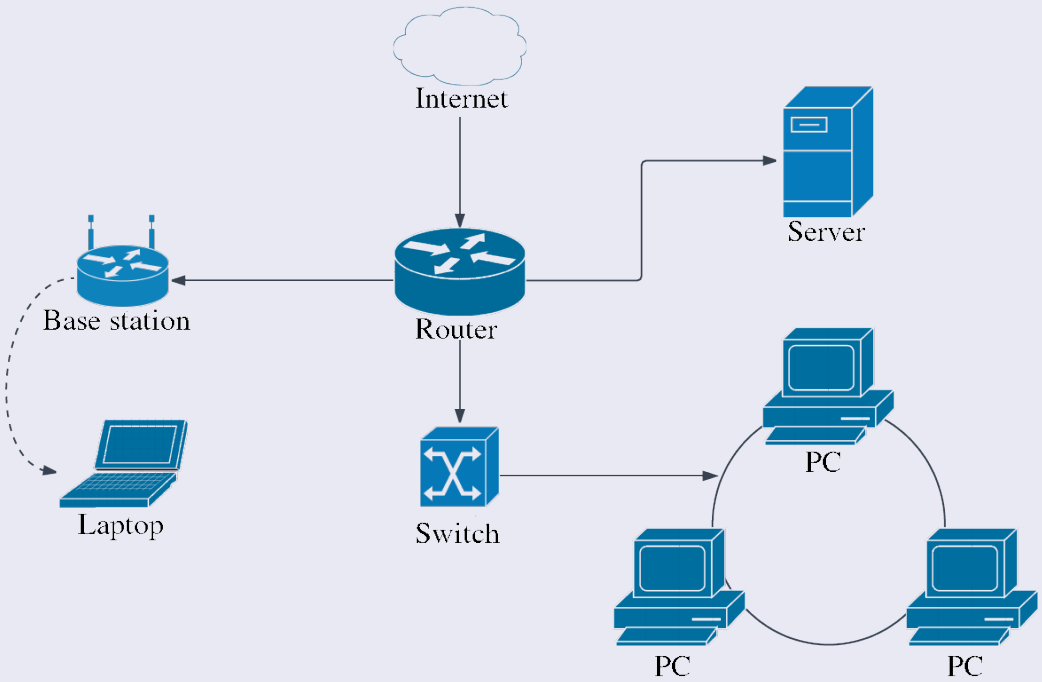
Qu'est-ce qu'un réseau informatique ?

- Des ordinateurs, plus généralement des équipements info.
  - reliés entre eux par des canaux de transmission
  - échangeant des informations sous forme binaire (instructions, données)
  - via la mise en œuvre d'un ensemble de protocoles de communication normalisés (règles d'échange ; formats de messages)
- Une réseau est dit :
  - homogène → composé d'équipements relativement homogènes
  - hétérogène → les équipements sont disparates

Cette notion dépend de ce que l'on compare. On peut par exemple considérer la puissance de calcul des machines ou encore le débit des canaux de transmission

Qu'est-ce qu'un réseau informatique ?

- Schématiquement, un réseau c'est
  - un ensemble de nœuds
  - reliés par un ensemble de chemins (des canaux de transmission)
  - qui peut être représenté sous la forme d'un graphe



Modèle de communication en couches - Généralités

- Une infrastructure réseau et les applications l'exploitant
  - s'appuient sur un ensemble / système de protocoles
  - qui définissent les règles de communication
- Il n'y pas un seul protocole qui s'occupe de toutes les tâches nécessaires à la bonne transmission des informations
  - Gestion des erreurs de transmission
  - Découpage des informations à transmettre en paquets
  - etc.
- Le système de protocoles a été découpé en plusieurs couches
  - Chaque couche effectue une tâche précise
  - Quand une couche a réalisé sa tâche, elle transmet l'info. à une couche voisine (supérieure ou inférieure)

Modèle de communication en couches - Transmission

- La plus élevée ⇒ la couche Application
  - La plus proche de l'utilisateur
  - On y trouve les protocoles applicatifs

  Citer quelques protocoles applicatifs

- Les plus basses ⇒ les couches Liaison de données et Physique

  Elles s'occupent de la transmission "locale" des informations

- La couche Liaison de données
  - Gère un canal de transmission partagé par au moins 2 nœuds
  - Permet aux nœuds (ou hôtes) de s'échanger des trames (une séquence ou suite de bits)

  Elle utilise les services de la couche Physique pour former des trames,

  les transmettre, en reconnaître le début et la fin lors de leur réception

Modèle de communication en couches - Transmission

- La couche Liaison de données
  - Définit en fonction des contraintes physiques du canal une méthode permettant d'accéder à celui-ci
  - Organise l'échange des trames
  - On dit également qu'elle s'occupe du *Medium Access Control*
  - Ses protocoles sont aussi appelés protocoles MAC
- Protocole star des couches basses $\Rightarrow$ Ethernet
  - Développé pour mettre localement en réseau des équipements
  - Apparu en 1973, le format des trames est définitif depuis 1982
  - L'Ethernet commuté a remplacé l'Ethernet partagé
    - Partagé $\rightarrow$ plusieurs nœuds (plus de 2) partagent un canal
    - Commuté $\rightarrow$ un canal relie 2 nœuds

Canal de transmission - Généralités

- Un canal de transmission est un lien reliant des nœuds
  - un nœud source ou émetteur → produit des infos à transmettre
  - un nœud destination ou récepteur → reçoit des infos
- Les bits sont envoyés en utilisant
  - un support physique de transmission, ou encore support (*medium*) de communication
  - qui les code sous forme d'ondes électromagnétiques

  Citer différents signaux physiques qui sont utilisés
- Un canal (une liaison) peut être
  - point à point → 1 source et 1 destination
  - point à multipoint → plusieurs destinations
- Un canal (une liaison) peut être exploité en mode
  - simplex → unidirectionnel
  - semi-duplex (ou *half-duplex*) → unidirectionnel à l'alterna
  - duplex (ou *full-duplex*) → bidirectionnel simultané

Canal de transmission - Généralités

- Caractéristiques de l'Ethernet
  - Partagé (ancienne version) → liaison physique point à multipoint
    - Nœuds connectés à un même bus et com. *half-duplex*
    - Une trame envoyée par un nœud est reçu par tout le monde
    - Des collisions de trames peuvent se produire (détectées)
  - Commuté (version actuelle) → liaison physique point à point
    - Communication *full-duplex* entre 2 nœuds
    - Disparition des collisions avec les **commutateurs** (*switch*)
    - Examine les trames et commute en décidant du / des port(s) de sortie (auto-apprentissage de la source → port associé)
- Normes des couches basses ⇒ IEEE 802
  - Couche Liaison de données découpée en 2 sous-couches
    - *Logical Link Control* (LLC)
      → chargée de la fiabilisation via un contrôle d'erreur et de flux
      → commune à toutes les normes IEEE 802.x
    - *Medium* (ou *Media*) *Access Control* (MAC)
      → fait le lien avec la couche Physique
      → dépend du type de réseau physique utilisé

Canal de transmission - Généralités

Quelques exemples de normes IEEE 802.x

- 802.3 ⇒ normes Ethernet
  - Réseaux filaires locaux
  - Exemple → Gigabit Ethernet déf. par 802.3z et 802.3ab
- 802.11 ⇒ normes WiFi
  - Réseaux sans fil locaux
  - Débits élevés (Gigabit et au-delà) généralement obtenus via la technique de multiplexage MIMO utilisant plusieurs antennes
- 802.15 ⇒ normes WPAN
  - Réseaux sans fil personnels
  - Exemples → Bluetooth et ZigBee

Canal de transmission - Débits

Débit ou taux de transfert, ou encore vitesse de transfert

Mesure la quantité d'information numérique transmise par unité de temps. Soit au niveau élémentaire le nombre de bits par seconde

Unités de mesure

- Des unités basées sur l'octet
- Des unités basées sur le bit

Chaque type existe sous forme d'unités en puissances de 2 et d'unités en puissances de 10. Par exemple : Mégabit en puissances de 10 et Mébibit en puissances de 2

Puissances de 10				*Puissances de 2*			
1 kilobit	kbit	1000 bits	10^3	1 Kibibit	Kibit	1024 bits	2^{10}
1 Mégabit	Mbit	1000 kbit	10^6	1 Mébibit	Mibit	1024 Kibit	2^{20}
1 Gigabit	Gbit	1000 Mbit	10^9	1 Gibibit	Gibit	1024 Mibit	2^{30}
1 Térabit	Tbit	1000 Gbit	10^{12}	1 Tébibit	Tibit	1024 Gibit	2^{40}

Canal de transmission - Débits

Unités de mesure

- Le bit par seconde (bit/s, b/s ou bps) et ses multiples en puissances de 10 → utilisés pour mesurer le débit d'un support physique de transmission (par ex. le débit d'un câble réseau)
  - 1 kilobit par seconde (kbit/s ou kbps) = 1000 bps
  - 1 Mégabit par seconde (Mbit/s ou Mbps) = 1000 kbps
  - etc.
- L'octet par seconde et ses multiples (Ko/s, Kio/s, etc.) → utilisés dans les applications / les protocoles de transfert

Canal de transmission - Débits

Débit théorique ou maximum

Quantité maximale d'information qui peut être transmise par le support physique par unité de temps

Débit utile ou effectif

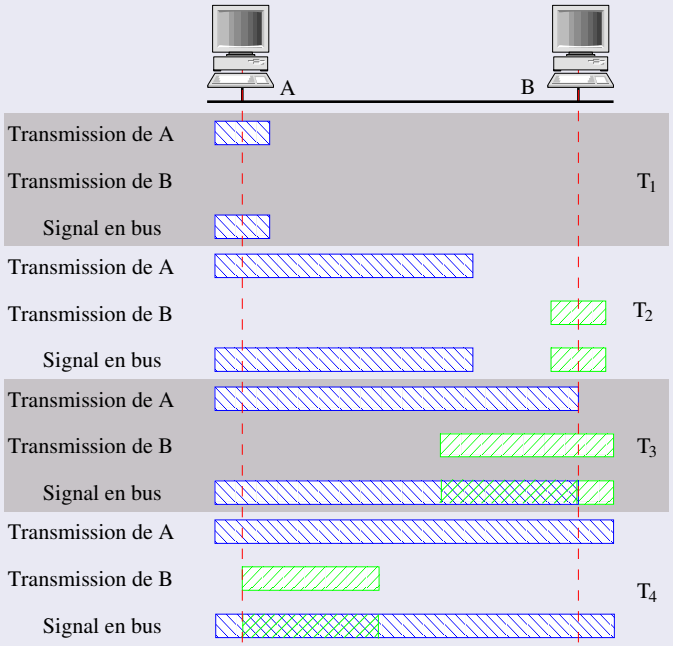
Quantité de données utilisateurs effectivement transmise par unité de temps (seconde)

- Différentes techniques sont mises en œuvre pour assurer la transmission $\rightarrow$ ajout de données à celles de l'utilisateur
- Correspond au débit théorique moins le débit affecté au contrôle de la transmission
- Une fraction du débit théorique appelée efficacité

$$\textbf{efficacité} = \frac{\text{débit utile}}{\text{débit théorique}}$$

Canal de transmission - Débits

- L'efficacité reflète les perf. des protocoles / supports physiques
  - Point important → le fait que réseau soit point à point ou point à multipoint / diffusion avec collision possible



  - Colllision → plusieurs nœuds utilisent un support avec accès multiple et cherchent à émettre en même temps
- Réseaux avec collisions (*Carrier Sense Multiple Access with*)
  - Ether. partagé (*Collision Detection*) ; WiFi (*Collision Avoidance*) ; ...

Canal de transmission - Délais

Délai

Un délai s'exprime en secondes, c'est une mesure du temps nécessaire pour réaliser une certaine action

Délai de propagation ou latence

- Correspond au temps de transit
- Dépend de la distance entre les nœuds et de la vitesse de propagation du signal induit par le support physique utilisé
- Vitesse de propagation définie à partir de la célérité (vitesse de la lumière dans le vide)

Délai de transmission

- Correspond au temps nécessaire pour transmettre l'info.
- Dépend de la quantité d'info / de données et du débit

Canal de transmission - Supports et codage des bits

- Bits transmis physiquement sous forme de signaux

  Signal **analogique** (continu) ou **numérique** (segmenté)

  - Conversion de bits en signaux
    $\rightarrow$ modulation (analogique) / codage (numérique)
  - Conversion de signaux en bits
    $\rightarrow$ démodulation / décodage

  Équipement dans le cadre analogique $\rightarrow$ modem

- Débit théorique ou maximum
  - Dépend de la bande passante (en Hertz) du support physique
    d'où l'utilisation abusive de ce terme pour désigner le débit

  Dans les réseaux Ethernet (filaires), la **catégorie** d'un câble définit sa bande passante max. Exemple : `Cat. 5` = 100 MHz

Canal de transmission - Supports et codage des bits

- Débit théorique ou maximum (suite)
  - Dépend du rapport signal sur bruit qui mesure la qualité d'un canal de transmission (en décibels - dB)
    - Rapport des puissances entre
      - le signal d'amplitude maximale pour laquelle la **distorsion** ou encore l'**atténuation** reste inférieure à une limite
      - le bruit de fond qui est le signal présent même en l'absence le signal de sortie
    - Distorsion et atténuation sont deux effets indésirables
      - Distorsion
        $\rightarrow$ déformation involontaire qui croît progressivement
      - Atténuation
        $\rightarrow$ perte de puissance du signal (réfraction ; etc.)

Canal de transmission - Supports et codage des bits

Rapidité de modulation (en bauds)

- Le signal transportant les bits est dépendant d'un *signal d'horloge* défini à partir de la bande passante
- Le *signal d'horloge* définit la **rapidité** (ou encore *vitesse*) de modulation R (en bauds - Bd)
  - Correspond au nombre de tops d'horloges (ou périodes élémentaires) dans 1 sec. et s'exprime en bauds (*symbol rate*)
  - Valeur maximale de la rapidité / vitesse de modulation

$$R = 2 \times W$$

avec W la largeur de la bande passante du support physique

  - Chaque support physique admet une fréquence de coupure basse (= fréq. min.) pouvant circuler et une fréq. de coupure haute. Bande passante = différence entre fréq. haute et basse
  - On a aussi une relation similaire à celle entre fréquence et durée d'une période, soit $R = \frac{1}{\Delta}$

Canal de transmission - Supports et codage des bits

Débit (en bit/s, b/s ou bps)

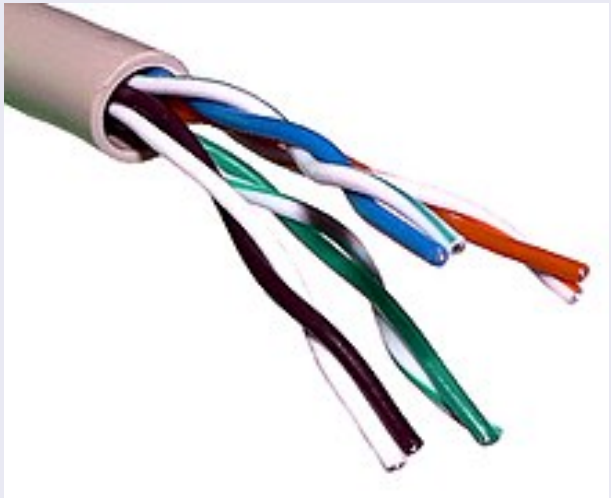
- Pour obtenir le débit D à partir de la rapidité de modulation
  $\rightarrow$ déterminer le nombre B de bits transportés sur 1 période
- B s'obtient à partir de la **valence** du signal, notée N
  $\rightarrow$ déterminer le nombre de signaux différents sur 1 période
- Finalement on a les relations suivantes (formule de Nyquist) :

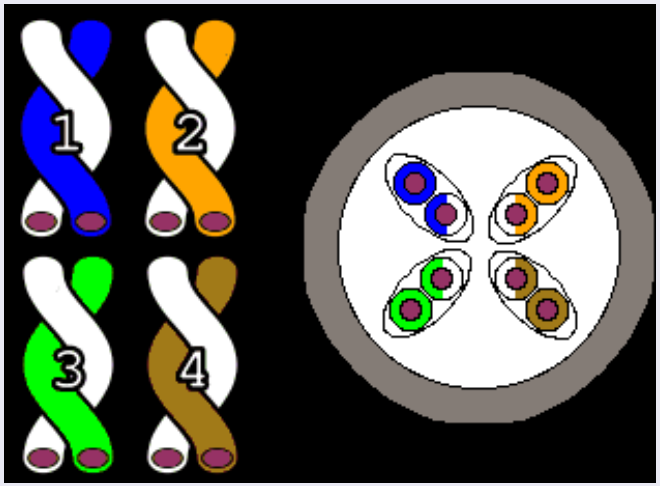
$$B = \log_2 N \text{ bits et } D = R \times B = R \times \log_2 N \text{ bit/s}$$

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Courte distance - Câble à paires torsadées

- Une paire torsadée
  $\rightarrow$ câble constitué de 2 brins de cuivre entrelacés en torsade
- Câble à paires torsadées
  $\rightarrow$ plusieurs paires dans une gaine protectrice (au plus 4 paires)
  $\rightarrow$ longueur $\leq$ 100 m ; se branche dans un connecteur RJ-45





Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Courte distance - Câble à paires torsadées (jusqu'à 1 Gbps)

- Utilisés dans les réseaux locaux Ethernet
  - Câble Ethernet
    - 10Base-T (1990) → 2 paires Cat. 3 (catégorie 3)
    - 10Base-T1S et 10Base-T1L (2019) → usage domotique, IoT
  - Câble Fast Ethernet (IEEE 802.3u)
    - 100Base-T4 (obsolète) → 4 paires Cat. 3
    - 100Base-TX (1995) → au moins 2 paires Cat. 5 (ou 5e)
  - Câble Gigabit Ethernet (GbE ou 1 GigE - IEEE 802.3ab)
    - 1000Base-T (1999) → 4 paires Cat. 5 (ou mieux)
    - 1000Base-TX (échec commercial)

Principe de désignation des câbles - Exemple : `1000Base-T`

- 1000 → le premier nombre donne le débit en Mbps
- `Base` → transmission en bande de base (numérique)
- `T` pour `T`*`wisted pair`* → le type de support (médium) physique

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Courte distance - Câble à paires torsadées (au-delà de 1 Gbps)

- Utilisés dans les réseaux locaux Ethernet
  - *Câbles 2,5 et 5 Gigabit Ethernet (IEEE 802.3bz)*
    - 2.5GBase-T et 5GBase-T (2016) $\rightarrow$ Cat. 5e, 6 ou 6a
    - Version "dégradée" du 10 GbE (vitesse de modulation $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$)
  - Câble 10 Gigabit Ethernet (10 GbE / 10 GigE - IEEE 802.3an)
    - Plus de support du CSMA/CD $\rightarrow$ full-duplex et relié obligatoirement à un commutateur (plus de concentrateur)
    - Cat. 6 (longueur de 55m) ou Cat. 6a et 7 (longueur de 100m)
  - Câbles 25 et 40 Gigabit Ethernet (IEEE 802.3bq)
    - 25GBase-T et 40GBase-T (2016) $\rightarrow$ Cat. 8.1 ou 8.2
    - 4 paires et longueur de 30m

40 et 100 Gigabit Ethernet (2010) $\Rightarrow$ "fin" de la paire torsadée

- xGBase-CR4 $\rightarrow$ câble cuivre twinax(ial) (longueur de 5 / 7 m)
- Adapté à la fibre optique $\rightarrow$ moins de 100 km (xGBase-ER4)

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

40 et 100 Gigabit Ethernet - Connectique twinaxial et fibre

- Émetteur-récepteur de type ***S**mall **F**orm-factor **P**luggable*
  - Module SFP → 100 Mbps à 4 Gbps
  - Module SFP+ / QSFP+ → 10GbE / 40GbE
  - Module SFP28 / QSFP28 → 25GbE / 100GbE
- Émetteur-récepteur de type ***C**(entum) **F**orm-factor **P**luggable*
  - Module CFP → 10× 10 Gbps, 4× 25 Gbps (conçu après SFP)
  - Module CFP2 → CFP + 8× 25 Gbps, 8× 50 Gbps
  - Module CFP4 → 4× 10 Gbps, 4× 25 Gbps
  - Module CFP8 → 16× 25 Gbps, 8× 50 Gbps (8 voies / *lane*)

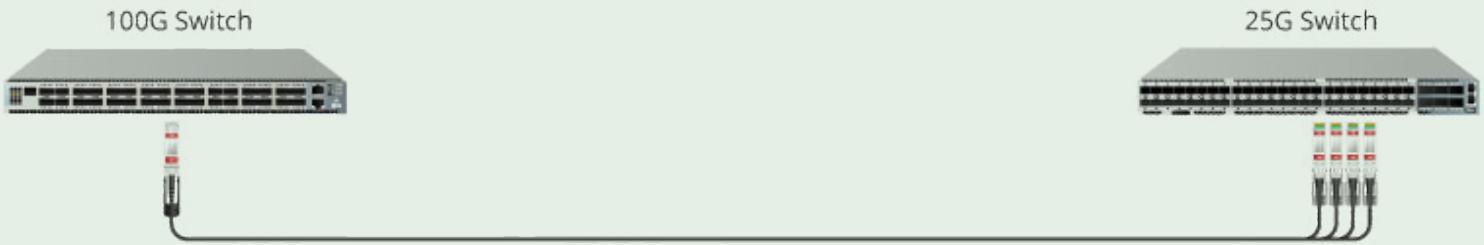
Câble twinaxial sur très courte distance ⇒ datacenter

Bascule des techno. cuivre vers les techno. fibre optique

(**CXP** → techno. cuivre InfiniBand - 100 / 120 Gbps)

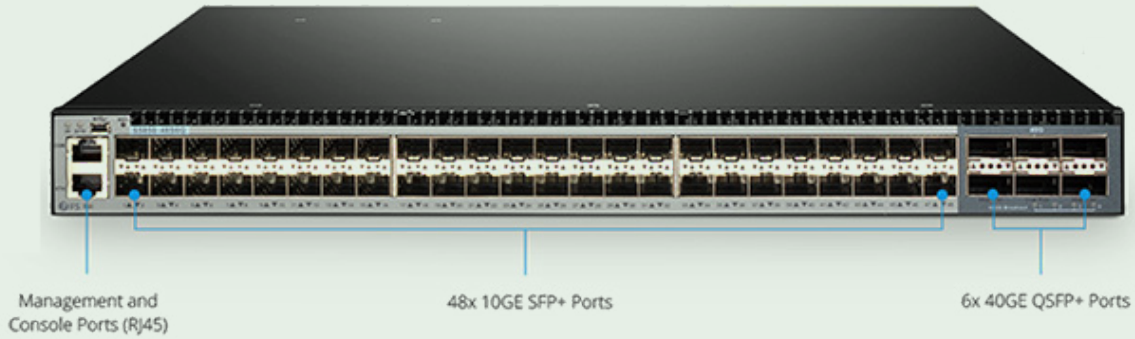
Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

40 et 100 Gigabit Ethernet - Connectique twinaxial et fibre



Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

40 et 100 Gigabit Ethernet - Connectique twinaxial et fibre



Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Courte distance - Protection des câbles à paires torsadées

Désignation ISO/IEC 11801

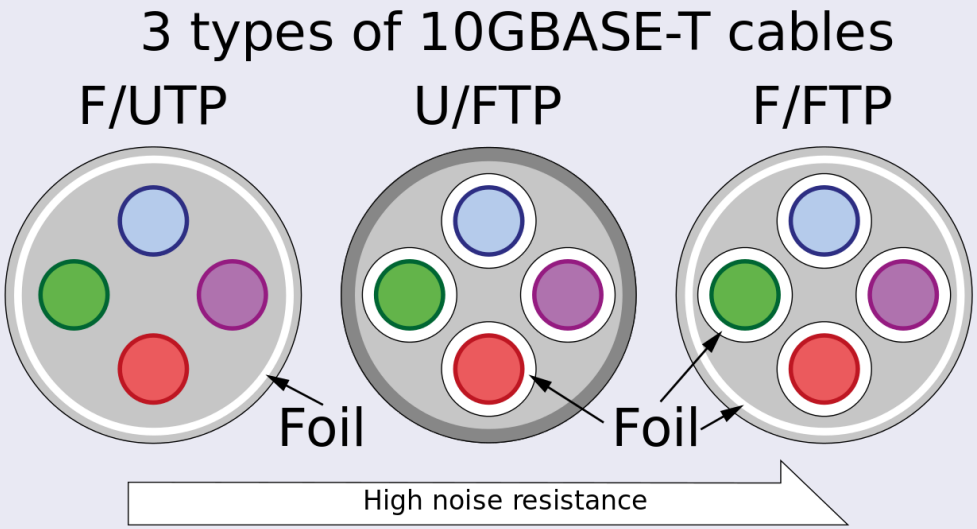
- Paires non blindées → U/UTP (*Unshielded/Unshielded Twisted-Pair*)
- Paires avec blindage général → F/UTP (*Foiled/Unshielded TP*)
- Paires blindées → → U/FTP (*Unshielded/Foiled Twisted-Pair*)
- Paires avec double blindage général → SF/UTP
- Paires blindées et avec blindage général → S/FTP
- Paires doublement écrantées → F/FTP

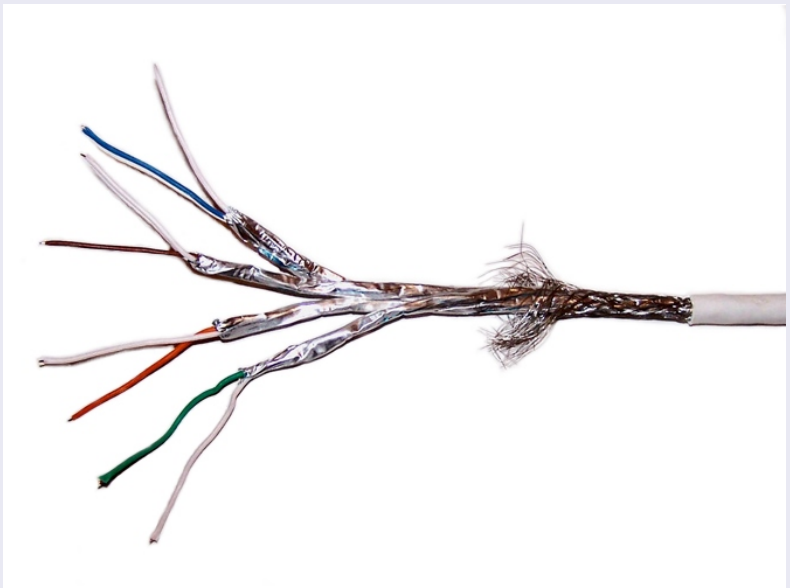
Types de protection

- *Shielded* → une tresse de cuivre - “blindage”
- *Foiled* → une feuille d’aluminium / un feuillard - “écrantage”

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Courte distance - Protection des câbles à paires torsadées





Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Courte distance - Différentes catégories de câbles

La catégorie d'un câble correspond à des caractéristiques physiques permettant d'accroître la bande passante

- Cat. 5 et 5e → bande passante de 100 MHz (max. 2,5 GbE)
- Cat. 6 et 6a → 250 MHz et 500 MHz (5 GbE et 10 GbE)
- Cat. 7 et 7a → 600 MHz et 1 GHz (5 GbE et 10 GbE) (connecteurs TERA, ARJ-45 et GG-45 rétro-compatibles)
- Cat. 8.1 et 8.2 → 1,6 GHz et 2 GHz (25GbE et 40GbE) (pour les datacenters)

Courte distance - Câble croisé *versus* droit

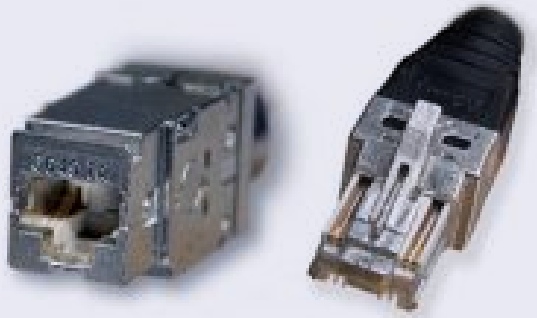
- Câble croisé → utilisé pour relier directement deux machines
- Câble droit → utilisé pour relier une machine à un équipement d'interconnexion (concentrateur, commutateur ou routeur)

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Courte distance - D'autres connecteurs que le RJ-45

TERA

ARJ-45

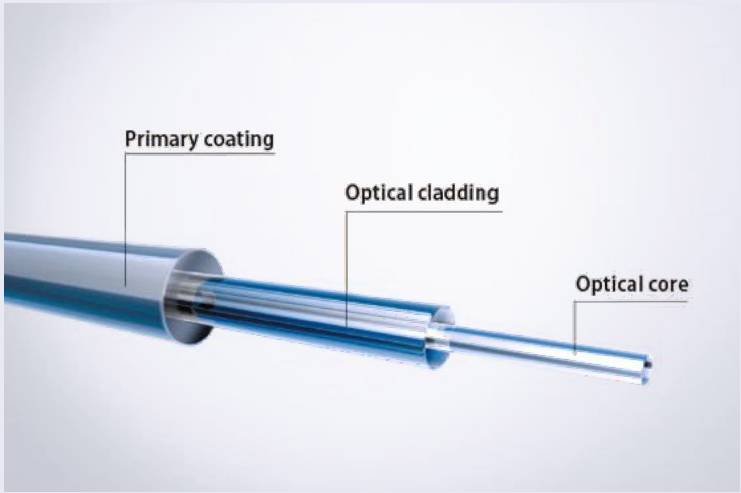


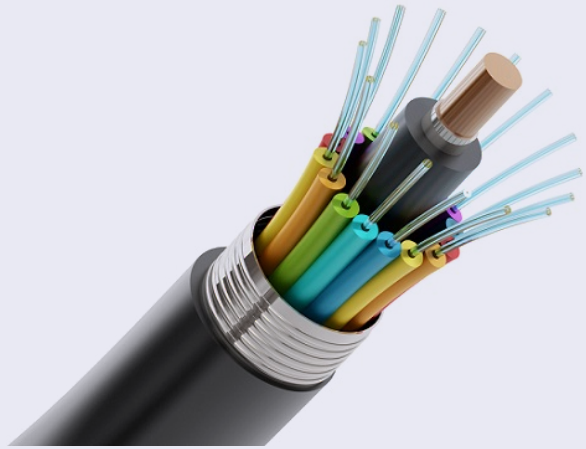
GG-45

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Fibre optique

- Cylindre creux ou gaine optique (*cladding*) constitué d'un matériau conduisant la lumière (fil de verre - $\varnothing$ 125μm)
- enveloppé dans un isolant ou gaine primaire (*coating*) (diamètre - $\varnothing$ 250μm)
- Transmission à très haut débit (Gigabit(s)) à longue distance par multiplexage de longueur d'onde



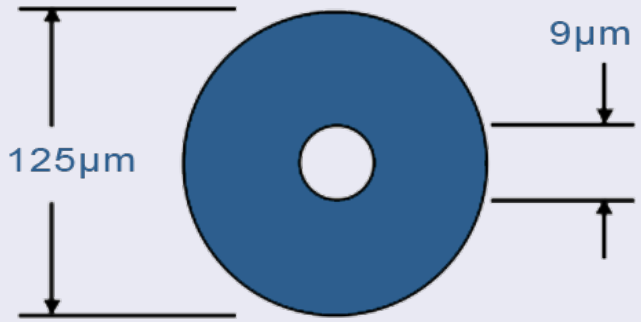


Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Fibre monomode ⇒ très longues distances

- ***S**ingle **M**ode **F**iber* (SMF) - ***O**ptical **S**inglemode fiber cable* (OS1 & OS2) → une onde / un "rayon"
- Diamètre du cœur → 9μm
- Émetteur → une source laser
- Longueur → 2 km, 10 km, 40 km, 80 km (plus avec répéteurs)

  40GBase-ER4 / 100GBase-ER4 → 40 km ; 100GBase-ZR → 80 km

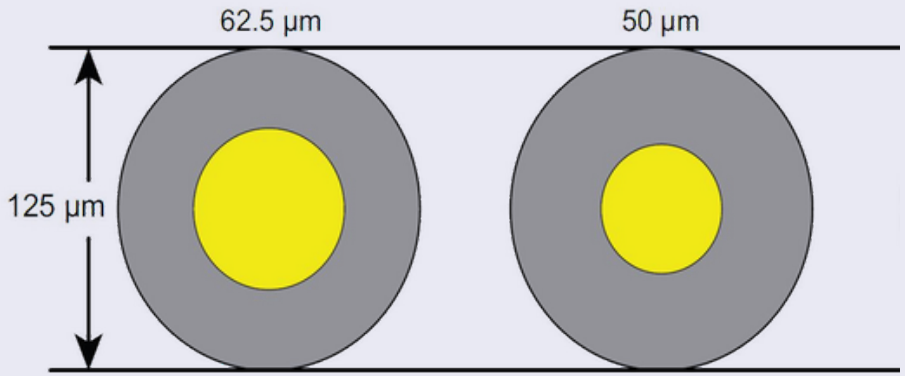


MMF FDDI 62.5/125 µm (1987)	MMF OM1 62.5/125 µm (1989)	MMF OM2 50/125 µm (1998)	MMF OM3 50/125 µm (2003)	MMF OM4 50/125 µm (2008)	MMF OM5 50/125 µm (2016)	SMF OS1 9/125 µm (1998)	SMF OS2 9/125 µm (2000)
160 MHz·km @ 850 nm	200 MHz·km @ 850 nm	500 MHz·km @ 850 nm	1500 MHz·km @ 850 nm	3500 MHz·km @ 850 nm	3500 MHz·km @ 850 nm & 1850 MHz·km @ 950 nm	1 dB/km @ 1300/ 1550 nm	0.4 dB/km @ 1300/ 1550 nm

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Fibre multimode ⇒ "courtes" distances

- ***M**ulti **M**ode **F**iber* (MMF) - ***O**ptical **M**ultimode fiber cable* (OM1, OM2, OM3, OM4, OM5) → plusieurs "rayons"
- Diamètre du cœur → de 50 à $62,5\mu$m
- Émetteur → une source LED ou laser (VCSEL)
- Longueur → au plus 2 km
  - 100 Mbps → jusqu'à 2 km (OM1, OM2, OM3 ou OM4) - 850 nm
  - 1 Gbps → 275 m (OM1) / 550 m (OM2 ou OM3) / 1 km (OM4)
  - 10 Gbps → 33 m (OM1) / 82 m (OM2) / 300 m (OM3) / 550 m (OM4)
  - 40 / 100 GBase-SR4 → 100 ou 150 m / 70 ou 100 m (OM3 ou OM4)



Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Différentes catégories de fibre optique

- OM1 $\rightarrow$ $62,5\mu$m ; bande passante de 200 MHz-km à 850 nm
- OM2 $\rightarrow$ 50μm ; bande passante de 500 MHz-km à 850 nm
- OM3 $\rightarrow$ 50μm ; 1500/2000 MHz-km à 850 nm
- OM4 $\rightarrow$ 50μm ; 3500/4700 MHz-km à 850 nm
- OM5 $\rightarrow$ 50μm ; 3500/4700 MHz-km à 850 nm
- OS1 $\rightarrow$ 9μm ; atténuation 1 dB/km à 1310 et 1550 nm
- OS1a $\rightarrow$ 9μm ; atténuation 1 dB/km à 1310, 1383 et 1550 nm
- OS2 $\rightarrow$ 9μm ; atténuation 0,4 dB/km à 1310, 1383, 1550 nm

***W**avelength-**D**ivision **M**ultiplexing* (WDM)

- OM5 $\Rightarrow$ ***S**hortwave* WDM $\rightarrow$ utilise 4 longueurs d'onde (4λ)
- 40 Gbps $= 4\lambda \times 10$ Gbps ; 100 Gbps $= 4\lambda \times 25$ Gbps ; 400 Gbps $= 4 \times 100$ Gbps

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

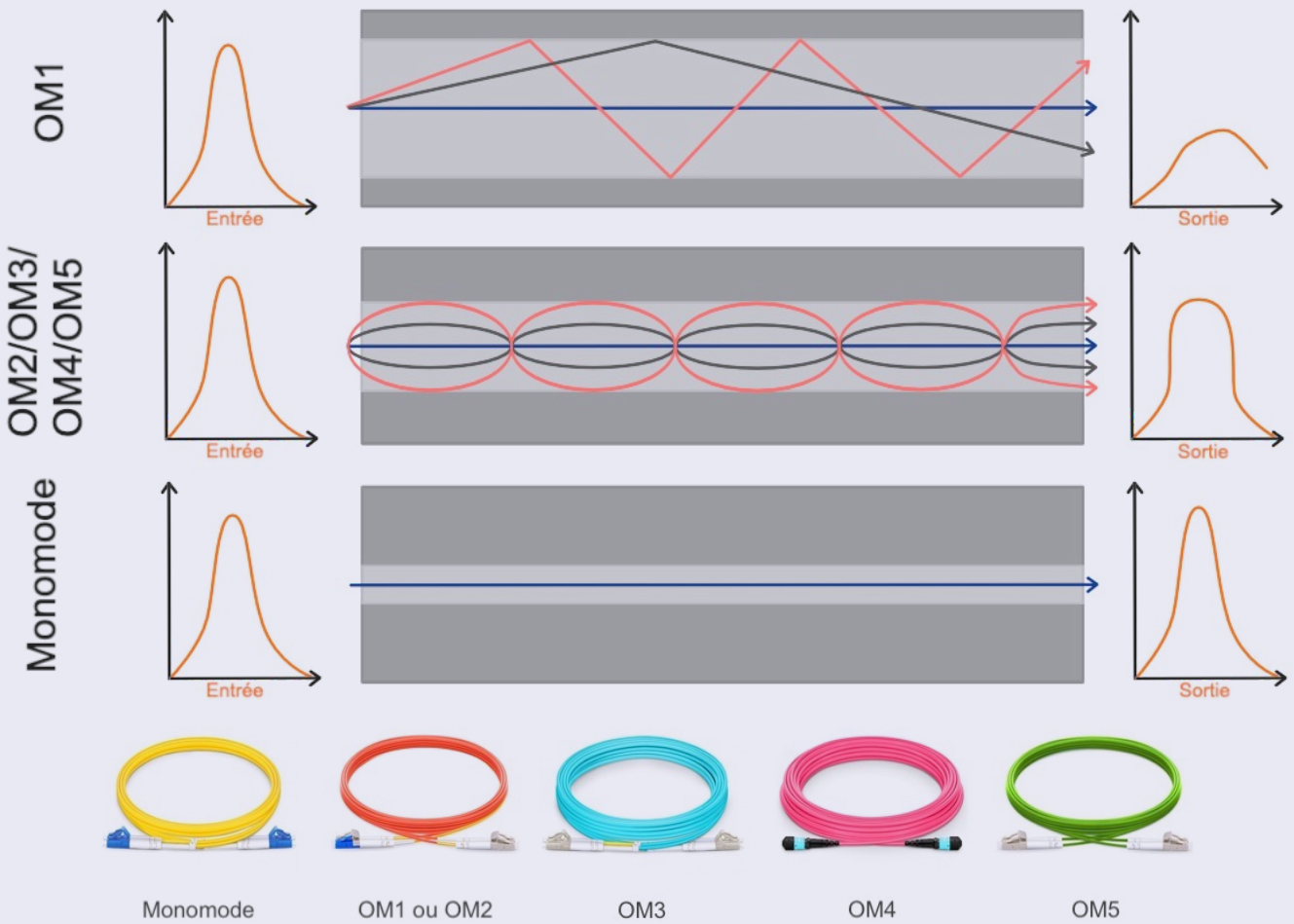
Longue distance - Fibre optique

- Récepteur → une photodiode ou un phototransistor
- Origine des très hauts débits → les ondes infrarouge utilisées correspondent à des fréquences de plusieurs centaines de THz
- Types de fibre, de la moins à la plus performante
  - Multimode à saut d'indice
    - Transmission par réfraction successive
    - L'onde parcourt une suite de ligne
  - Multimode à gradient d'indice
    - Transmission par réfraction successive
    - L'indice diminue doucement depuis le centre
    - L'onde ressemble plus à une sinusoïde
  - Monomode
    - Trajectoire plus contrôlée / imposée de l'onde

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Fibre optique

- Types de fibre, de la moins à la plus performante



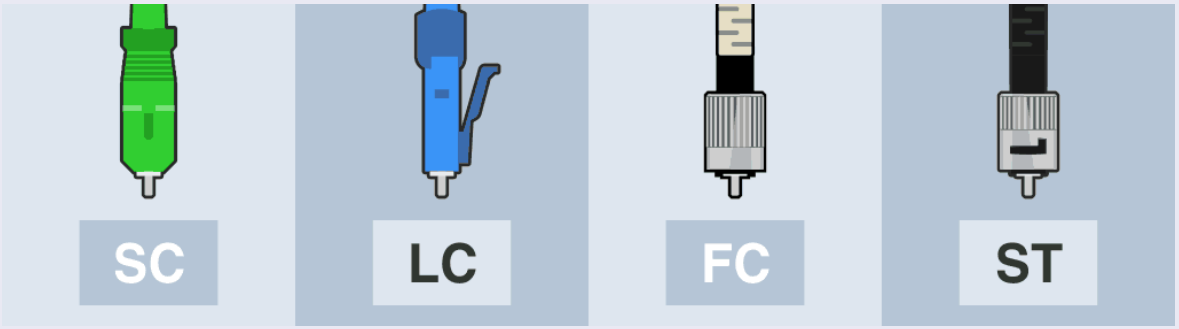
Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

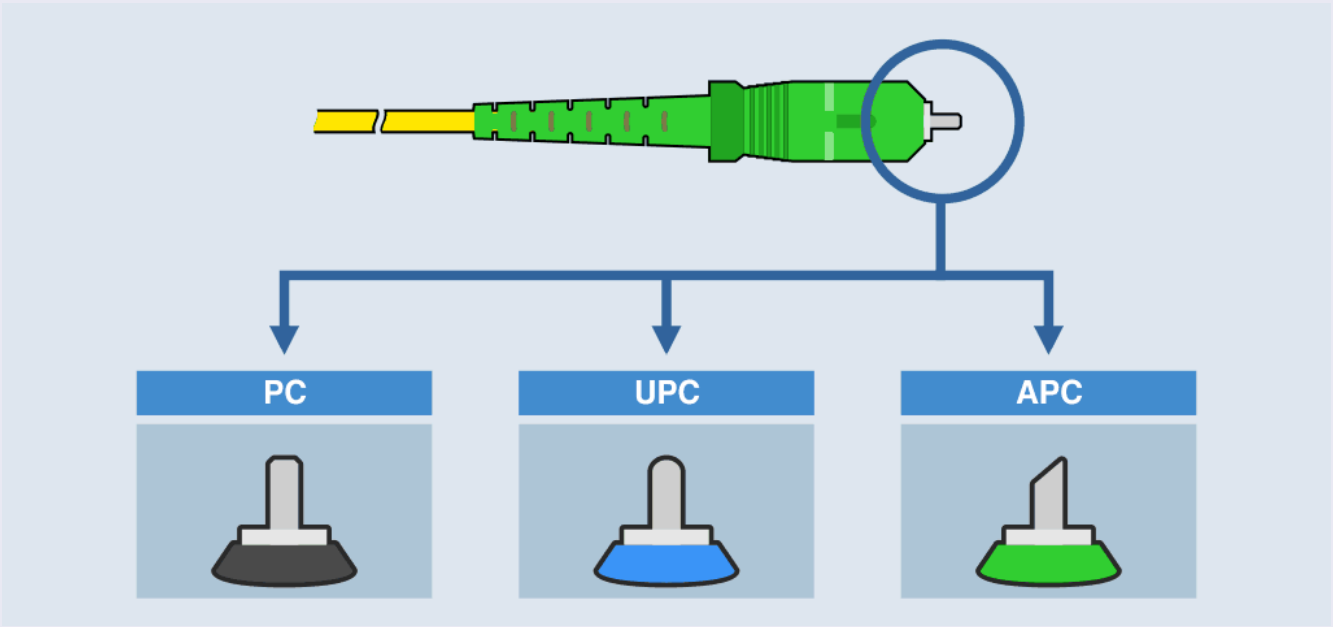
Longue distance - Fibre optique ⇒ raccordement des périphériques

- Câble ou jarretière optique constitué d'une gaine avec
  - Simplex → 1 fibre
  - Duplex → 2 fibres
- Connecteur défini par 2 termes séparés par un tiret
  1. Type de connecteur
     - ***F**errule **C**onnector* (Nippon Telegraph & Telephone)
     - ***S**traight **T**ip* (AT & T)
     - ***L**ucent **C**onnector* (Lucent)
     - ***S**ubscriber **C**onnector* (Nippon Telegraph & Telephone)
  2. Type de polissage appliqué à la terminaison optique (ferrule)
     - ***P**hysical **C**ontact* (surface convexe)
     - ***U**ltra **P**hysical **C**ontact* (courbure accentuée)
     - ***A**ngle **P**hysical **C**ontact* (inclinaison de 8 degré)

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Fibre optique ⇒ connecteurs et polissage





Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

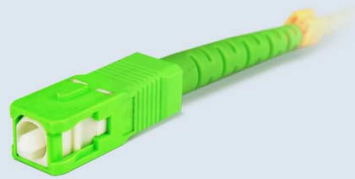
Longue distance - Fibre optique ⇒ type de connecteurs

Connecteur FC →

Connecteur ST →

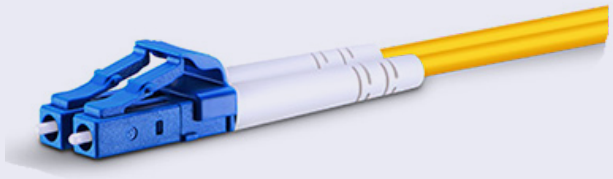
Connecteur LC →

Connecteur SC →

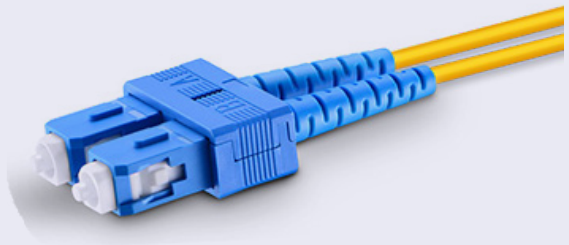


Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Fibre optique ⇒ jarretières simplex *vs.* duplex



Duplex LC Fiber connector
vs
Simplex LC Fiber Connector



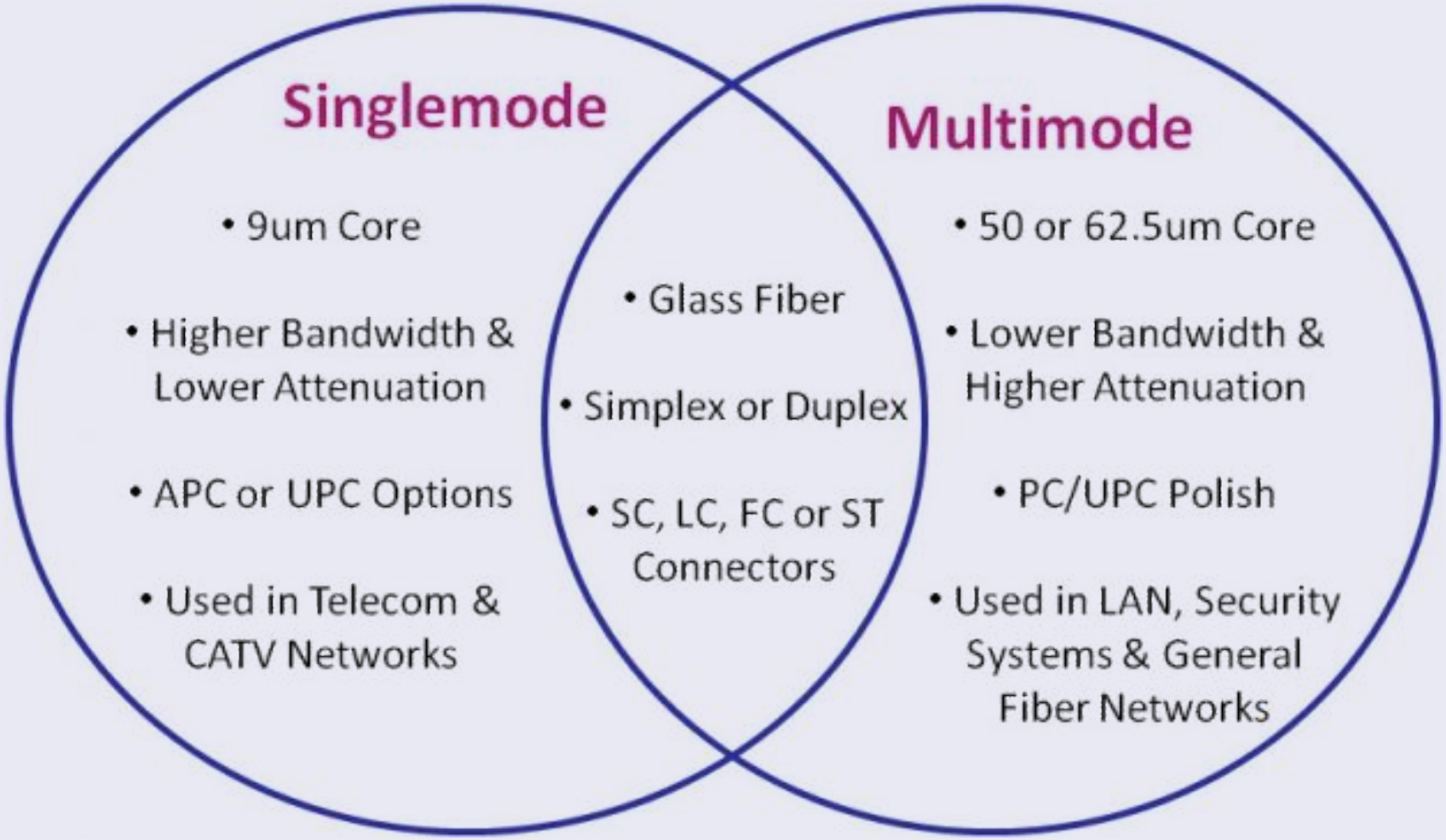
Duplex SC Fiber connector
vs
Simplex SC Fiber Connector

Fibre optique duplex monobrin ⇒ 1 fibre pour les 2 sens

Deux longueurs d'onde voyageant dans des directions opposées

Canal de transmission - Supports - Réseaux filaires

Longue distance - Fibre optique ⇒ résumé



Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Transmission numérique ou bande de base (*Baseband*)

- Transmission des bits sous forme d'un signal électrique ou optique via des impulsions de durée et amplitude précises
- Transmission directe sous la forme d'un signal segmenté
  $\rightarrow$ les harmoniques principales du signal sont contenues dans la bande passante du support
- Rôle du codeur / décodeur
  $\rightarrow$ transformer un signal numérique en un autre signal numérique plus adapté au support de transmission considéré

Différents types de codage

- *Unipolar* $\rightarrow$ tension nulle et $+V$ Volts (tout ou rien - NRZ)
- *Polar* $\rightarrow$ $-V$ et $+V$ Volts (NRZL, NRZI, RZ, Manchester)
- *Bipolar* $\rightarrow$ $-V$ Volts, tension nulle et $+V$ Volts
- *Multi-level* $\rightarrow$ plusieurs niveaux de tensions (MLT-3)

Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Unipolar coding ⇒ tout ou rien - NRZ (**code sans transition**)

- Bit 0 → signal de tension nulle
- Bit 1 → signal de tension $+V$ Volts

Polard coding ⇒ ***N**on **R**eturn to **Zero*** et variantes

- NRZ**L**(*evel*) (**code sans transition**)
  - Bit 0 → signal de tension $-V$ Volts / pas de signal lumineux
  - Bit 1 → signal de tension $+V$ Volts / un signal lumineux

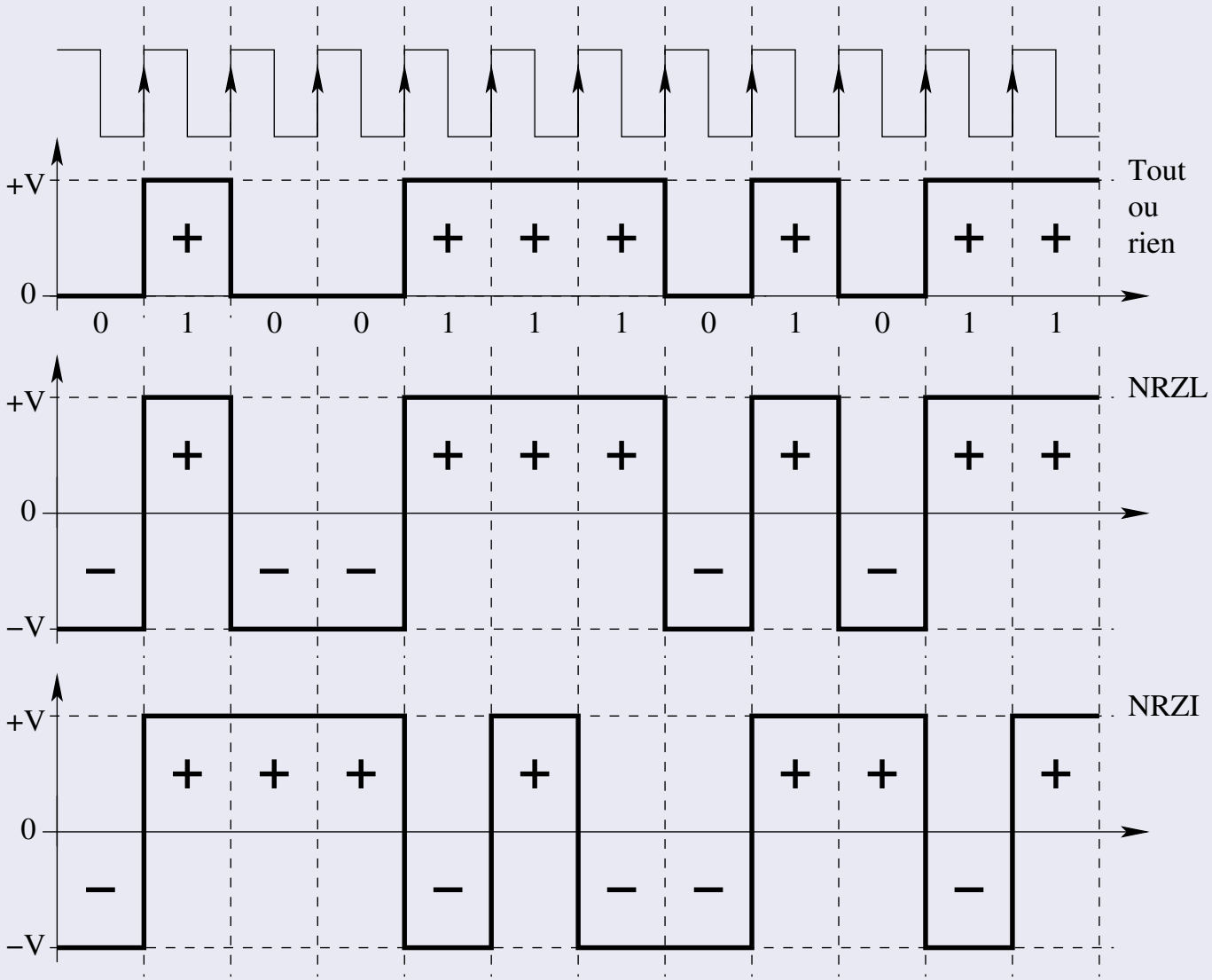
  Perte de synchronisation dans de longues séquences de 0 et 1

- NRZ**I**(*nverted*) (**code à transition**)
  - Bit 0 → pas de changement du signal
  - Bit 1 → transition en début de période

  Utilisé par exemple dans les réseaux Fast Ethernet 100Base-FX

Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Illustration des codes tout ou rien, NRZL et NRZI



Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Polar coding ⇒ ***R**eturn to **Z**ero* (**code à transition**)

NRZL avec un retour à la tension nulle au milieu de chaque période

- Bit 0 → signal de tension $-V$ Volts, puis tension nulle
- Bit 1 → signal de tension $+V$ Volts, puis tension nulle

Polar coding ⇒ *Manchester* (**code à transition**)

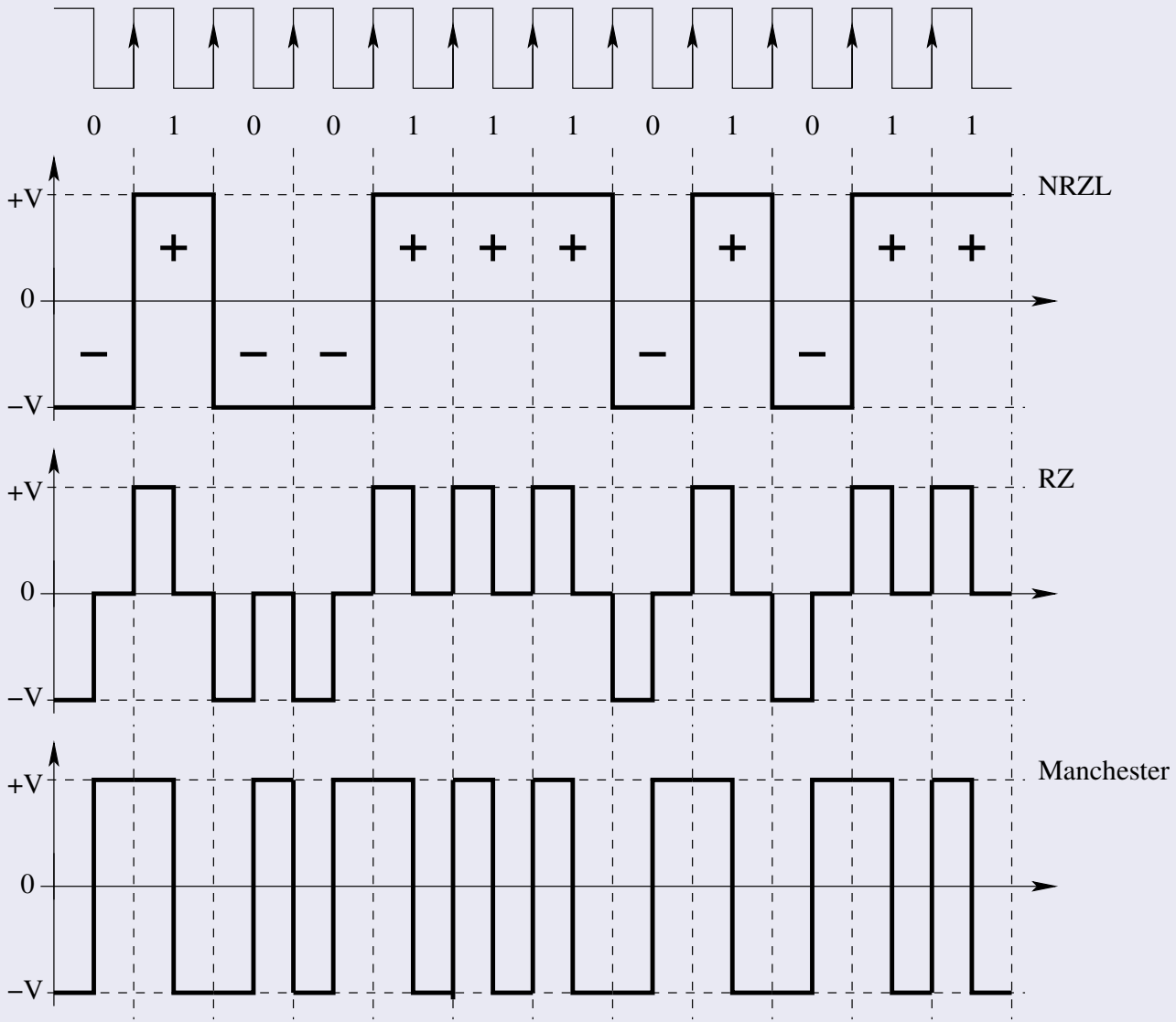
Une transition au milieu d'une période élémentaire

- Bit 0 → front montant ($-V$ à $+V$ Volts au milieu)
- Bit 1 → front descendant ($+V$ à $-V$ Volts au milieu)

Nouveaux codages pour réduire divers pb, dont la synchronisation
Multi-level coding (ou **Codage à plusieurs niveaux**)
et **Block coding** (ou **Codage bloc**)

Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Illustration des codes NRZL, RZ et Manchester



Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Codage à plusieurs niveaux ⇒ ***M**ulti-**L**evel **T**ransmit* 3 (MLT-3)

Changement si bit à 1 → 4 bits à 1 pour faire un cycle complet

- Bit 0 → pas de changement de signal
- Bit 1 → codé successivement sur $+V$, 0 et $-V$ Volts

Utilisé par exemple dans les réseaux Fast Ethernet 100Base-TX

Codage à plusieurs niveaux ⇒ ***P**ulse **A**mplitude **M**odulation* (PAM)

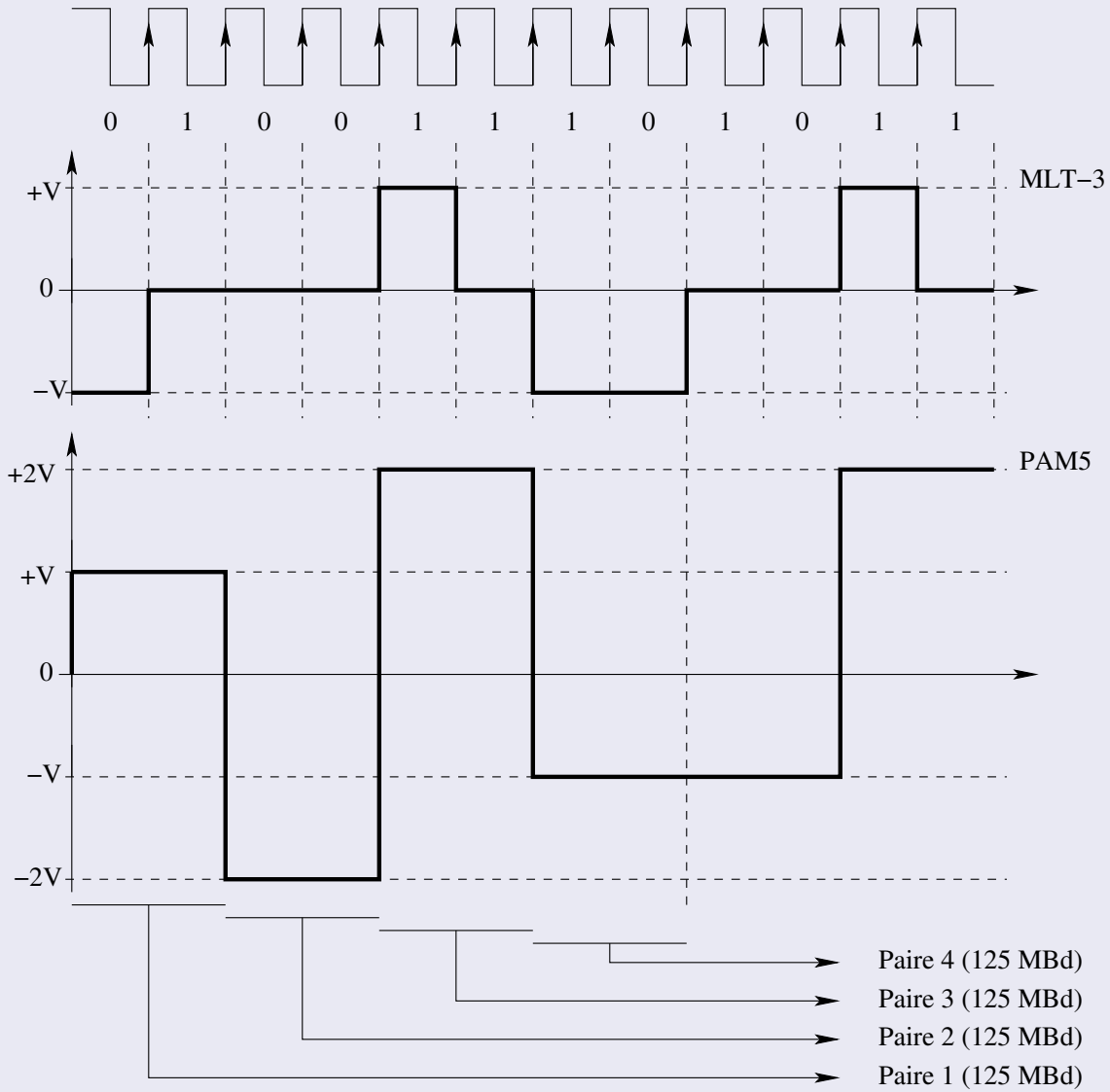
- PAM-2 → NRZ ; PAM-3 → 100Base-T4
- PAM-4 → fibre, par ex. 100GBase-DR (*symbol rate* : 53, 1250 GBd)
- PAM-5 → 1000Base-T avec Codage 4D-PAM5
  - 4D → utilise les 4 paires torsadées dans les 2 sens (paire bidir.)
  - PAM5 → modulation à 5 niveaux d'où $B = 2$ bits

$$D(\text{ébit}) = (R \times B) \times 4 = (125\ \text{MBd} \times 2) \times 4 = 1\ \text{Gbps}$$

- PAM-16 → 10GBase-T ($D = (800\ \text{MBd} \times 3,125) \times 4 = 10\ \text{Gbps}$)

Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Illustration des codes MLT-3 et PAM-5



Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Codage bloc *m*b/*n*b

Contrôle de la distribution des 0 et 1 dans les séquences transmises

- Séquence à transmettre découpée en blocs de m bits
- Chaque bloc de m bits est remplacé par un bloc de n bits
  - m et n sont tels que $m < n$
  - Pas plus de 1 bit à 0 au début ;
  - Pas plus de 2 bits à 0 consécutifs
- Exemple avec le code 4b/5b utilisé dans 100Base-TX
  - Séquence découpée en blocs de 4 bits $\rightarrow$ remplacés par des codes de 5 bits

Données	Code	Données	Code
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Canal de transmission - Codage des bits - *Baseband*

Codage des bits en pratique - Quelques exemples

- Câble à paires torsadées
  - Fast Ethernet - 100Base-TX
    - Codage 4b/5b et NRZI / MLT-3 - *Symbol rate* : 125 MBd (blocs émis à 25 MHz)
  - Gigabit Ethernet - 1000Base-T
    - Codage 4D-PAM5 - *Symbol rate* : 125 MBd (sur 1 paire)
- Fibre optique
  - Fast Ethernet - 100Base-FX / -LFX / etc.
    - Codage 4b/5b et NRZI - *Symbol rate* : 125 MBd
  - Gigabit Ethernet - 1000Base-SX
    - Codage 8b/10b et NRZ - *Symbol rate* : 1,25 GBd
  - 100 Gigabit Ethernet - 100GBase-SR4 (4 liens 25GbE - 2015)
    - Codage 256b/257b et NRZ - *Symbol rate* : $4 \times 25,78125$ GBd
  - 100 Gigabit Ethernet - 100GBase-SR2 (2 liens 50GbE - 2018)
    - Codage 256b/257b et PAM-4 - *Symbol rate* : $2 \times 53,125$ GBd

Canal de transmission - Codage des bits

Transmission analogique ou large bande (*Broadband*)

- Dans une transmission numérique le signal se dégrade avec la distance → utilisable que sur “très” courte distance
- Principales harmoniques du signal non incluses dans la bande passante → transposition du signal pour qu'il y rentre
- Pour des trans. longue distance ou sans fil, on utilise un signal sinusoïdal → pourra être décodé même affaibli
- Bits transmis en modulant / démodulant le signal sinusoïdal → onde porteuse
- Conversion d'un signal numérique en un signal analogique (modulation) et inversement (démodulation) → modem

Canal de transmission - Codage des bits

Transmission analogique ou large bande (*Broadband*)

- Trois façons possible de moduler une onde porteuse
  $\rightarrow$ 3 paramètres la définissent (combinaisons possibles)
- Définition d'une onde porteuse $s(t)$

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \phi)$$

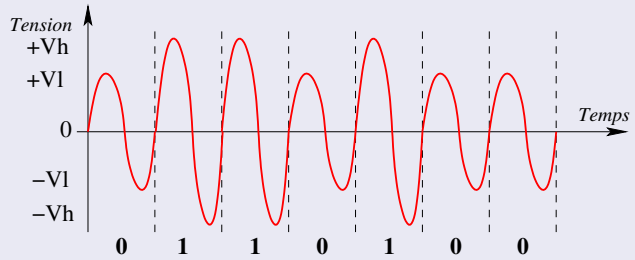
on a ainsi :

1. la modulation d'amplitude (***A**mplitude **S**hift-**K**eying* ou ***A**mplitude **M**odulation*) $\rightarrow$ une valeur de A = un niveau logique
2. la modulation de fréquence (***F**requency **S**hift-**K**eying*)
   $\rightarrow$ une valeur de f = un niveau logique
3. la modulation de phase (***P**hase **S**hift-**K**eying*)
   $\rightarrow$ une valeur de ϕ = un niveau logique

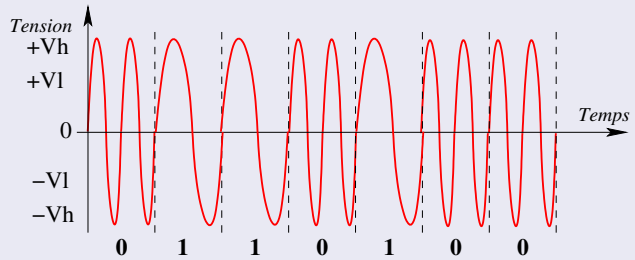
Canal de transmission - Codage des bits

Illustration des différentes modulation d'onde porteuse

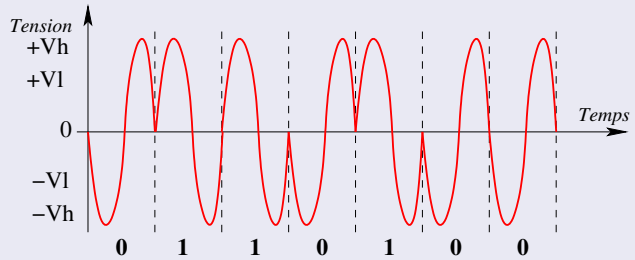
- Modulation par amplitude : $Vl \rightarrow 0$, $Vh \rightarrow 1$



- Modulation par fréquence : 2 oscillations $\rightarrow$ 0, 1 osc. $\rightarrow$ 1



- Modulation par phase : phase négative $\rightarrow$ 0, ph. positive $\rightarrow$ 1



Canal de transmission - Codage des bits

Codage des bits - Exemple : l'ADSL1

- Bande de fréquence → 0 kHz-1,1 MHz
  - Scindée en 256 intervalles de 4,3125 kHz (milieu = fréq. porteuse) → ***F**requency **D**ivision **M**ultiplexing* (multiplexage fréquentiel)
  - À chaque canal / intervalle n est associé une sous-porteuse dont la fréquence est $n \times 4,3125$ kHz
  - Seul(e)s les canaux / sous-porteuses 7 à 256 sont utilisées
    - canal 1 → téléphonie
    - canaux 2 à 6 → zone tampon
    - canaux 7 à 39 → flux montant
    - canaux 39 à 256 → flux descendant

  ADSL équivalent à la mise en parallèle de 250 modems
- Modulation en amplitude et en phase (***Q**uadrature **A**mplitude **M**od.*)
  - x val. d'amplitude et y val. de phase → Valence $N = x \times y$
  - Ex : 16-QAM → 16 états / signaux possibles → bloc de 4 bits
  - Une sous-porteuse peut envoyer au max 15 bits → 32768-QAM