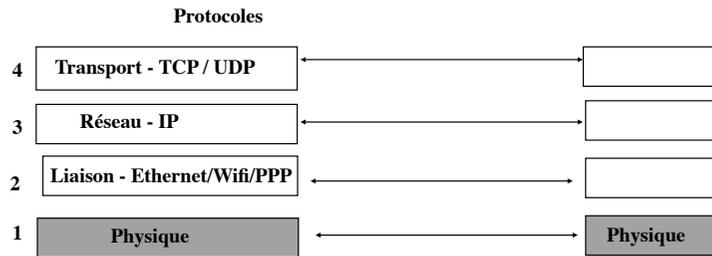


## La couche physique



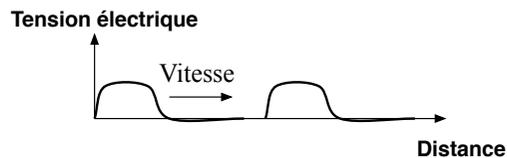
## La couche physique

1. Notions de débit, vitesse et bande passante
2. Accès multiples: différentes solutions
3. Forme d'onde: type de codage
  - Bande de base
  - Modulation
4. Débit physique et débit « applicatif »
5. Types de supports et caractéristiques des réseaux existants

## Vitesse et temps de propagation

– Codage de l'information binaire à l'aide d'une onde physique

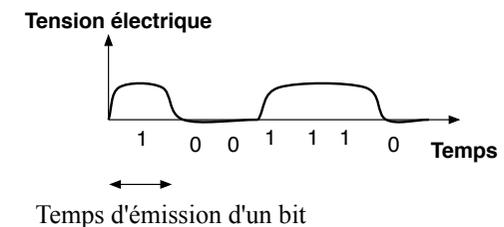
- Exemple :



- Une onde possède une vitesse qui dépend du support
- Le temps de propagation dépend de la vitesse  $V$  de l'onde et la longueur  $L$  du support :  $L/V$

## Débit et temps d'émission

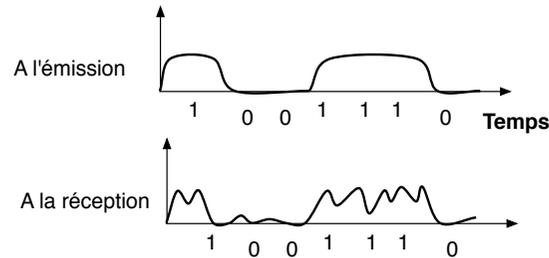
- Exemple :



- Le débit d'une ligne est défini par le nombre de bits émis par seconde sur le support
- Le débit  $D$  dépend du temps  $T$  nécessaire pour émettre un bit :  $D= 1/T$
- $D=100$  Mégabit/s  $T=0,01$  microseconde= 10 nanosecondes
- Débit et vitesse de l'onde sont complètement indépendants

## Limitation du débit

- Une onde s'affaiblit (atténuation) et se modifie (distorsion) lors de son déplacement sur le support.
- Atténuation et distorsion du signal dépendent du support et de sa longueur
- De plus elle peut être modifiée par des bruits extérieurs
- Les supports sont plus ou moins sensibles aux bruits



## Limitation du débit physique

- **Bande passante d'un support (pour une longueur donnée):**

C'est la plage de fréquence pour laquelle le signal ne sera pas trop modifié, et donc reconnaissable à l'arrivée. En général elle est donnée pour un affaiblissement inférieur à 3 décibels

Exemples:

- Paire torsadée: 1 à 2 mégahertz sur quelques kilomètres
- Fibre optique: quasi illimités (permet d'obtenir des débits de plusieurs centaines de gigabits/s sur des centaines de kilomètres)

**A savoir**, par abus de langage, on parle de bande passante pour désigner le débit possible sur un réseau

## Des supports aux caractéristiques très variables

- **Débits Physiques**
  - Très variable suivant : les supports et la distance
  - Quelques mégabits/s (ADSL) au gigabits/s pour les réseaux locaux et fibre optiques

- **Délai de propagation: Longueur/vitesse**

Réseau	Vitesse de l'onde	Distance	Temps de propagation
Satellite géostationnaire	$\sim 300 \cdot 10^6$ m/s	36000 km	$\sim 250$ ms
Fibre optique	$\sim 200 \cdot 10^6$ m/s	200 km 1000 km	1 ms 5 ms
Rés.Téléphonique Paire torsadé	$\sim 170 \cdot 10^6$ m/s	200 km	1,2 ms
Réseau local Ethernet	$\sim 170 \cdot 10^6$ m/s	150 m	$\sim 1$ microseconde

## Le problème des erreurs

- **Taux d'erreur:** probabilité de perte (ou de modification) pendant le transfert d'une information élémentaire

- Réseaux étendus:

- » ADSL sur ligne téléphonique:  $10^{-3}$  à  $10^{-9}$
- » Fibre optique :  $10^{-9}$
- » Satellite:  $10^{-6}$  à  $10^{-11}$

- Réseaux locaux: de  $10^{-12}$

- Ces caractéristiques vont intervenir dans les protocoles des couches supérieures

- Par exemple : nécessité de faire de la détection d'erreur
- Qualité de la détection d'erreur

## Accès multiple: solutions par partage “statique” du support

- Le problème : envoyer plusieurs ondes en même temps sur un support
  - Exemple : réseau radio, plusieurs émetteurs
- Peut être résolu au niveau physique de façon statique mais aussi au niveau liaison de donnée, sous couche MAC: (Medium Acces Control) par un *accès dynamique*
- Pour le partage des *accès statiques*, on parle de multiplexage
  - Soit en fréquence
  - Soit temporel

## Multiplexage en fréquence

### • Définition et propriétés

- La bande passante de la ligne physique est divisée en un certain nombre de sous-canaux plus étroits (en terme de fréquence) affectés en permanence aux machines accédant au support
- On peut émettre en même temps sur ces différents canaux
- En réception, on sait distinguer les signaux si les plages de fréquence sont bien séparées (Transformée de Fourier)
- Limitation: le nombre de sous-canaux (et donc de machines) est restreint
- Les sous-canaux sont affectés en permanence, donc peu efficace quand les émissions sont irrégulières et si le nombre d'émetteurs change

## Multiplexage en fréquence

### • Exemples :

#### • Les radios FM

- Plage de 87,5 – 108 MHz, canaux indépendants multiples de 100KHz
- On change de radio en changeant de canal de fréquence



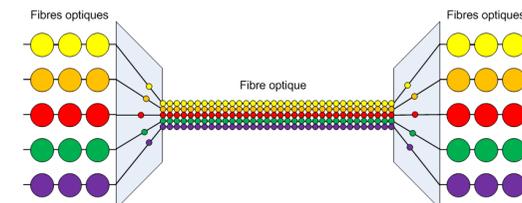
#### • Multiplexage des voies téléphoniques analogiques

- Une voie téléphonique sur la boucle locale : un sous-canal de largeur 4 KHz suffit pour transporter la voix analogique
- Groupe primaire : regroupe 12 voies téléphoniques dans un canal de largeur 48 khz
- Si plusieurs groupes primaires sont multiplexés sur le même support, 5 groupes primaires forment un groupe secondaire (60 voies)
- Certains supports pouvaient supporter jusqu'à 230 000 voies téléphoniques

## Multiplexage en fréquence

### • Sur fibre optique:

- Wavelength Division Multiplexing (WDM)
- Exemple en Dense-WDM: 8 à 128 sous canaux de 10 à 40 gigabit/s chacun
  - Dans la pratique souvent 80 canaux de 10 gigabit/s
- Utilisé pour raccorder plusieurs fibres optiques provenant de différents utilisateurs



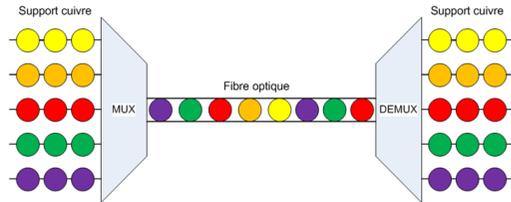
## Multiplexage temporel (TDM : Time division Multiplexing)

- **Définition**

On affecte à chaque flux à tour de rôle la totalité du débit binaire de la voie pendant une fraction de temps fixe

- **Mise en œuvre :**

- Le train de bits de débit D sur la voie est divisé en trames de L intervalles de temps. Chaque intervalle de temps permet l'envoi d'un octet (ou d'un bit) en provenance des différents utilisateurs (débit D/L)



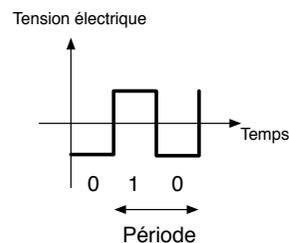
- Utilisé sur les artères du réseau téléphonique avec l'apparition des circuits numériques
- Utilisé aussi sur la fibre optique (normes SONET et SDH)

## Transmission Comment transmettre des 1 et des 0 à l'aide d'une onde physique

- L'information binaire peut être représentée par différents états physiques du signal
- Exemple d'états physiques : Deux tensions électriques -1 volt, 1 volt sur un câble qui représentent le 0 et 1 binaire
- Un symbole par état physique possible
- Valence : nombre de symboles différents pouvant être utilisés
  - Exemple : quatre tensions électriques: Valence = 4; chaque tension peut représenter la valeur de 2 bits.
- Nombre de symbole par seconde est limité par la bande passante du support. Unité: bauds

## Modes de transmission Le mode de base (ou bande de base)

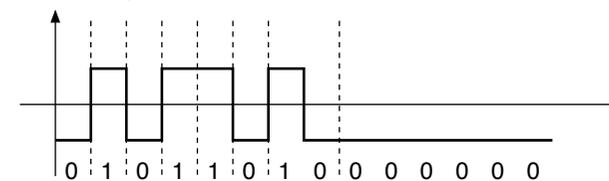
- On transmet « directement » l'information binaire à l'aide de signaux pouvant prendre n états physiques différents (n est appelé la valence)
- Exemple: deux tensions électriques -1 et 1 volt sur un support métallique ; valence = 2



## Exemples de codage en bande de base

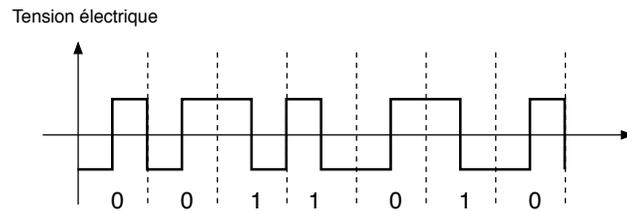
- **Codage NRZ (Non-return to Zero)**
- Problème de synchronisation émetteur /récepteur : séparation de plusieurs valeurs identiques à la suite
- A 100 mégabit/s le temps d'émission d'un bit = 10 nanosecondes

Tension électrique



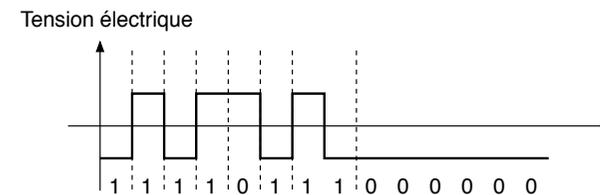
## Le codage Manchester (ou biphasé)

- Utilisé dans Ethernet 10 base T (0, 85 volts, -0, 85 volts, 0 volt au repos)
- Une transition différente pour chaque bit: par exemple montante code un 0, descendante code un 1
- **Intérêt:** Permet une meilleure synchronisation du récepteur mais le débit maximal est divisé par 2 par rapport au NRZ



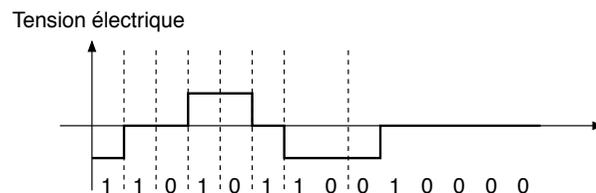
## Le codage NRZI (Non return To Zero Inverted on One)

- Une transition représente un 1, Pas de transition représente un 0
- Toujours le problème des non transitions pour les suites de 0
- Couplé avec un codage 4b5b : On ajoute 1 bit pour chaque groupe de 4 bits dont la traduction est prise dans un dictionnaire (exemple: 0000 transformé en 00001)
- Utilisé pour l'USB et dans le 100 base FX (Ethernet sur fibre optique 100 Mégabits/s)



## Le codage MLT-3 ou NRZI-3 (MultiLevel Transition)

- Trois niveaux -1, 0 et +1
- Toute transition code un 1 (+1, 0, -1, 0, +1 ...) et pas de transition un 0
- Utilisé dans le 100 base TX (Ethernet sur paire torsadée 100 Mégabits/s) couplé à un codage 4b5b



## Modes de transmission: la modulation

- L'information codée sert à modifier un ou plusieurs des paramètres (amplitude, fréquence, phase) d'un signal sinusoïdal appelé onde porteuse
- Utilisé sur les lignes téléphoniques à travers les Modems (Modulateur/démodulateur)
- Plus adapté pour des supports à forte atténuation (moyenne distance) et bruits importants (comme les boucles locales des lignes téléphoniques)
- Multiplexage fréquentiel sur grosse artère pour le transport de plusieurs communication sur un même fil

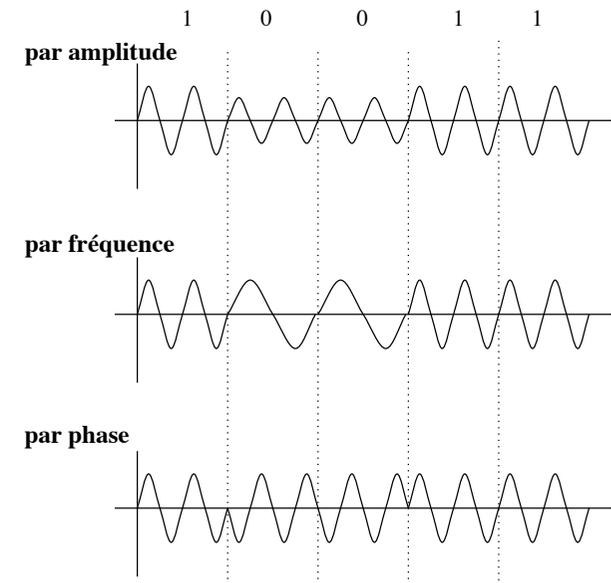
## Principe de la Modulation

- Modem: modulateur/démodulateur
- L'information codée sert à modifier un ou plusieurs des paramètres (amplitude, fréquence, phase) d'un signal sinusoïdal appelé onde porteuse et représenté par :

$$- v(t) = a \sin(\omega\tau + \varphi)$$

- Modulation
  - par fréquence
  - d'amplitude
  - de phase

## Modulations

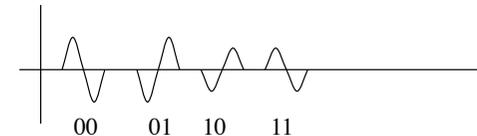


## Combinaison des modulations

- Les premiers modems utilisaient une bande passante de 2400 bauds (2400 échantillons reconnaissables par seconde)
- Si une seule modulation (d'amplitude par exemple):
  - un échantillon: deux motifs (ou symbole) possibles (Valence = 2)
    - 1 bit / échantillon donc débit de 2,4 kilobit/s
- Solution : Pour augmenter le débit sans changer de bande passante, on augmente le nombre de motifs par échantillon

## Combinaison des modulations

- Exemple: Combinaison de 2 phases et 2 amplitudes
- 4 motifs différents permettant de coder 2 bits chacun



- On double donc le débit possible pour la même bande passante
- On peut augmenter le nombre de combinaison, par exemple de 4 phases et de 4 amplitudes
  - » 4 amplitudes et 4 phases donnent 16 motifs donc 4 bits possibles par échantillon
  - » Avec la même bande passante de 2400 bauds, on arrive à un débit de  $4 \times 2,4 = 9,6$  kbits/s

## Combinaison des modulations

- Evolution progressive des débits des modems par ce type de technique
  - Exemples:
    - \* Premiers Modem à 9,6 kilobit/s (4 bits par échantillon à 2400 bauds)
    - \* Modem V34 à 28 800 bit/s : 12 bits par échantillon
    - \* Norme V90:
      - 8000 bauds (plage de fréquence de 4 kHz utilisé pour la « voix analogique »)
      - 8 bits par échantillon : 64 kbits/s
      - 7 bits de données + 1 bits de contrôle d'erreur : 56 kbits/s pour les données

## Modulation ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

- Sur boucle locale en paire torsadé
- On ne se limite plus au 4 KHz nécessaire à la voix mais à une bande passante de 1,1 MHz (et maintenant 2,2 MHz pour l'ADSL2+)
- Bande passante dépend de la distance à la desserte locale ADSL (inférieure à ~2km pour les plus hauts débits)
- Aujourd'hui : offre théorique jusqu'à 28 mégabits/s en réception et jusqu'à 1 mégabit/s en émission (ADSL 2+)
- Chez moi, j'ai mesuré 3 / 0,8 Mégabit/s pour l'ADSL et 20 / 6 Mégabit/s en 4G !

## Modulation ADSL

- Multiplexage en fréquence sur des canaux de 4 KHz
- 3 plages de fréquences indépendantes
  - Voie téléphonique ordinaire: premier canal (0 à 4 KHz)
  - En émission numérique : 31 canaux (4 KHz à 128 KHz)
  - En réception numérique : 223 canaux restants (128 KHz à 1,1 MHz)
- En émission et réception numérique :
  - Utilisation des techniques des anciens modems sur chacun des canaux
  - Exemple: en réception:
    - un canal: 4000 échantillons/s, 15 bits par échantillon,
    - 223 canaux: 60 kbits/s \* 223 = 13,38 Mbit/s

## Modulation ADSL

- Sensibilité aux bruits importante
  - Taux d'erreurs important implique l'ajout de mécanisme de détection et correction d'erreur
  - Mesure au départ et pendant la communication du taux d'erreur et adaptation dynamique des modulations choisies sur chaque porteuse (de 2 à 15)

## Débit physique/ débit applicatif

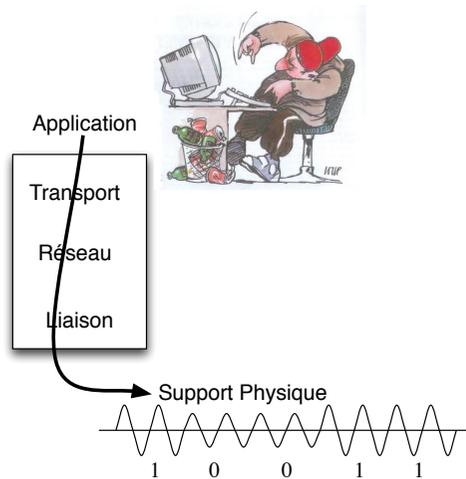
- **Débit physique**

- Débit exact sur le support physique
- Dépend de la bande passante

- **Débit applicatif (ou utile)**

- Débit de l'émission des données applicatives
- Observé au niveau des applications par l'utilisateur

- **Débit applicatif peut être nettement inférieur au débit physique**



## Des informations supplémentaires à échanger nécessaires aux protocoles

- Exemple : 26 octets, 20 octets, 20 octets, 1 à 1500 octets



- On peut calculer le débit applicatif résultant:
- Temps d'émission d'un paquet de donnée applicative est forcément supérieur au Temps d'émission au niveau physique
- Temps d'émission des données = taille paquet / débit applicatif
- Temps d'émission = taille paquet émis sur le support / débit applicatif

- Donc:

$$\frac{\text{Taille données}}{\text{Débit applicatif}} \geq \frac{\text{Taille paquet}}{\text{Débit Physique}}$$

$$\text{Débit applicatif} \leq \text{Débit Physique} \times \frac{\text{Taille données}}{\text{Taille paquet}}$$

- Taille du paquet = taille des données + taille des entêtes
- Exemple: 66 octets de données applicative pour 66 octets d'entête:
  - » Débit-applicatif  $\leq (66/132) \times \text{Débit-physique} = \text{Débit-physique} / 2$
- Il vaut mieux envoyer des **gros paquets** !

## Des réseaux à accès unique (Ethernet, WIFI...)

Pas de multiplexage en fréquence donc

- A un instant donné une seule machine peut émettre
- Accès dynamique, possibilité de collision des ondes (émission inutile)
- Les protocoles vont se débrouiller pour qu'il y ait le moins possible de collisions
- On divise (au moins) le débit physique possible par le nombre d'utilisateurs

## Sur un réseau maillé étendu (Internet)

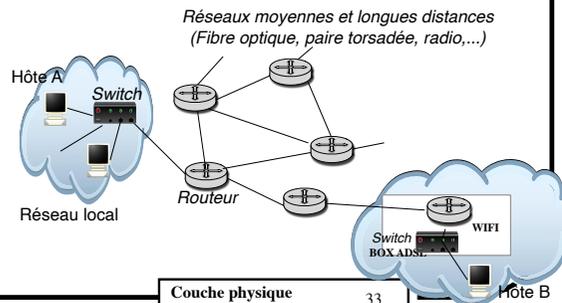
Une charge importante implique une augmentation importante :

- de la latence (temps d'attente dans les routeurs augmente)
- du débit moyen de chaque flux

De plus, en cas de congestion, il peut y avoir de nombreuses pertes

En cas de perte il faut :

- S'apercevoir de la perte
- Re-émettre les paquets perdus



## Les supports existants

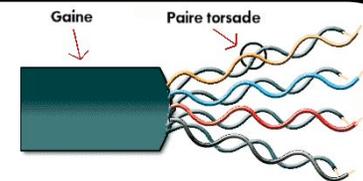
- **Non réseaux: CD, DVD, Clé USB, bande magnétique**
  - 1000 DVD \* 7 gigaoctets en 24 h = 648 Mégabit/s
  - Clé USB de 32 gigaoctets en 10 minutes: 426 Mégabit/s
- **Métalliques: Câble coaxial, paire torsadée**
  - Les plus utilisés dans les réseaux locaux
- **Verre: Fibre optique**
  - En déploiement constant depuis une vingtaine d'année pour les WANs
  - Utilisé aussi pour les réseaux locaux
- **Immatériel: ondes , radio**
  - Radio: très utilisé pour les réseaux étendus, en pleine croissance pour les réseaux locaux : Wifi, Bluetooth
  - Laser, infrarouge : très directionnel, utilisé ponctuellement (dans les LANs)

## Supports métalliques

- Fils simples : Utilisé pour les distances courtes (dans un ordinateur)
- Problème de parasitage (très sensible aux bruits extérieurs)
- Réseau électrique: le **CPL** (Courants porteurs en ligne)
  - \* Protocole Ethernet sur réseau électrique
  - \* Prise RJ45 / prise électrique
  - \* Débit théorique jusqu'à 500 Mégabits/s
  - \* Débit utile diminue très rapidement avec l'éloignement :
    - \* 56/55/10 Mégabits/s à 1/10/40 mètres pour un débit théorique de 200 Mégabits
  - \* Gros inconvénient: Forte perturbation vers et depuis les ondes courtes (en particulier radio)



## Supports métalliques: la paire torsadée



- Paire de fils torsadés:
  - 2\* 1 mm de cuivre isolé, résiste mieux aux interférences extérieures
- Réseau téléphonique (boucle locale en paire torsadée)
  - Prise RJ11 sur le téléphone : 2 paires
  - Câbles de 4 paires chez l'utilisateur (prise en T) à 112 paires (voir plus)
    - Modem : Au départ 9,6 kbit/s à 56 kbit/s (norme V90 avant 2000)
    - RNIS: Réseaux National à Integration de service (Numéris 1990 à 2000)
      - Deux canaux numériques à 64 Kbit/s pour la voix numérisée ou les données
    - ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) (à partir de 2000)
      - Débits effectifs jusqu'à : Réception 28 mégabit/s/Emission 1 Mégabit/s
      - Bande passante dépend de l'éloignement aux centres de commutations



## Réseaux locaux en paires torsadées

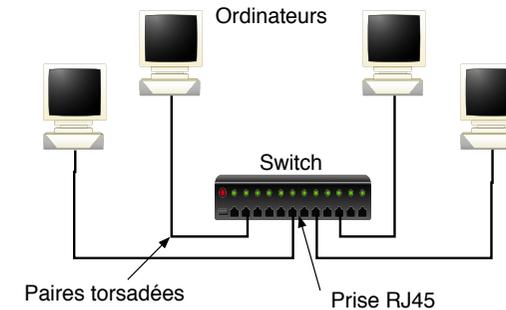


CLIQUET à APPUYER !!!

- Prise RJ45
- Norme de blindage: (résistance aux perturbations)
  - U/UTP (Unshielded Twisted Pair) non blindée, U/FTP, S/FTP ...
- Catégorie: 5, 5e, 6, 6e, 7 (suivant débit désiré)
  - 5e : jusqu'à 2,5 Gigabit/s sur 100 mètres
  - 6 : jusqu'à 2,5 Gigabit/s sur 100 mètres, 10 Gigabit/s sur 55 mètres
  - voir <http://www.latelierducable.com/cable/cable-rj45/bien-choisir-son-cable-rj45/>
- Normes Ethernet:
  - 10 Mégabit/s (10baseT),
  - 100 Mégabit/s (100baseTX),
  - 1 Gigabit/s (1000 base T),
  - 10 Gbase T

## Un exemple: le réseau Ethernet en paire torsadée

- Câble UTP5: 1 paire utilisée en entrée, 1 paire en sortie
- **Commutateurs (Switch)** centralisés dans une armoire de brassage pour faciliter l'administration et la maintenance



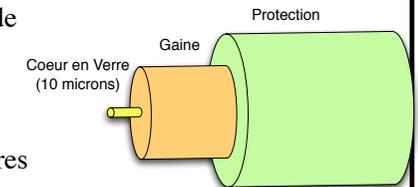
## Supports métalliques : les câbles coaxiaux

- Ame en cuivre - isolant - tresse métallique- gaine de protection
  - Résistant aux bruits
  - Mieux que la paire torsadée sur la longue distance
- **Utilisation en “Bande de base”**
- 1 km jusqu'à 1 giga bit/s
  - Très utilisé pour longue distance du réseau téléphonique
  - Utilisés en réseaux locaux mais supplantés par la paire torsadée en local et par la fibre optique en longue distance
- **Utilisation en “Large bande”**
- Fréquence plus grande
  - Transmission par modulation
  - Télévision câblée, accès à Internet



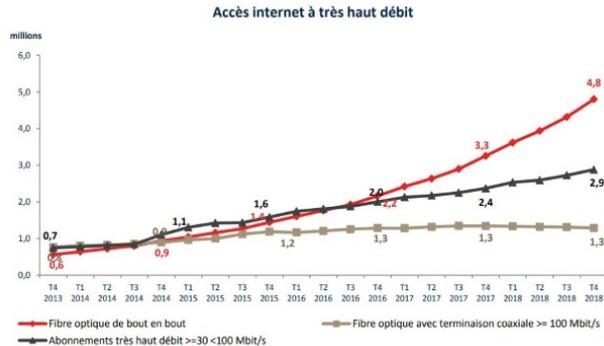
## Fibres optiques

- Tube en verre très fin (1 cheveu) recouvert d'une gaine isolante à la lumière et d'une gaine de protection
- Utilisé en simplex (2 fibres)
- Certains «câbles» regroupent plusieurs fibres
  - Ethernet 100 base FX, 1000 base SX et 1000 base LX
- Jusqu'à 100 km : plusieurs Gigabit/s (10<sup>9</sup> bits)
  - Exemple Ethernet 802.3ae: 10 Gigabit/s jusqu'à 40 km
  - 100 Gigabit/s
- Limitation due au passage de l'optique à l'électrique
  - Record 1 péta-bit/s sur 50 km (péta = 1000 téra)



## Fibres optiques

- France Télécom: 1,3 million de km de fibres en 1996
- Plusieurs milliers de km de fibre optique (jusqu'à l'abonné) sur Paris dès 2007 par l'opérateur Free
- En 2014 le conseil général annonce le déploiement de 3000 km de Fibre dans l'Isère



## Les ondes lumineuses

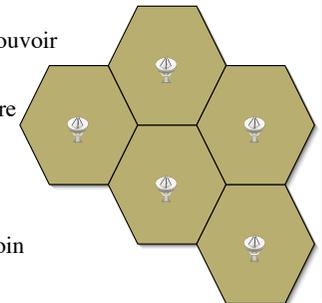
- **Rayons infra rouges**
  - » Faible portée : télécommande de TV
  - » Facile à mettre en oeuvre
  - » Omnidirectionnelles
  - » Peu utilisés car supplantés par les ondes radio
- **Rayons lasers**
  - » Peu coûteux, large bande passante
  - » Très directif : problème des interceptions (nuage, brouillard)
  - » Sensible aux intempéries (chaleur)
  - » Utilisé ponctuellement pour des applications spécifiques
  - » Par exemple pour la communication inter satellite

## Ondes radio

- Très grande distance avec les satellites géostationnaires
- Grandes distances (100 km): Tours Hertzienne, très utilisées pour la télévision et les artères principales du téléphone jusqu'aux années 90
- Moyennes distances (30 km): Internet des objets (Sigfox et LoRaWAN)
- Petites distances (250 m): les réseaux locaux (Wi-Fi)
- Limitation de l'allocation des plages de fréquences
- Débit dépend de la plage de fréquence utilisée (100 Mhz à 1 GigaHertz)
- Introduit le problème de confidentialité, implique le cryptage des données transportées (IPsec)

## Réseaux cellulaires

- **Téléphones portables**
- **Au départ analogique (essai en 1956 en France): maintenant numérique**
  - Problème du nombre d'utilisateurs simultanés : multiplexage fréquentiel. Attente importante suivant le nombre d'utilisateur, peu de succès
- **Découpage cellulaire** permettant de réutiliser les plages de fréquences sur des cellules assez éloignées
  - Surface géographique découpée en petites cellules pour pouvoir réutiliser plages de fréquence
  - Cellules: quelques centaines de mètres à 30 km de diamètre suivant la densité de communications
  - Les cellules voisines n'utilisent pas les mêmes plages de fréquence
  - Puissance des appareils limitée pour ne pas émettre trop loin
  - Une antenne d'émission/réception par cellule : Nombre d'antennes important



## Normes Réseaux cellulaires

- **Cellulaire norme européenne: GSM (Global System Mobile Communications, 1990):**
  - Débit: 14 kbit/s
  - Numérisation du son , Compression propre à GSM, Modulation
- **Evolution du GSM : le GPRS (General Packet Radio Service, 2001)**
  - permet le transfert d'information en plus de la voix
  - 110 kbit/s max en fait 20 à 30 kbit/s utiles
- **3ème génération : UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, 2004 en Europe)**
  - 3GPP: Débit limité de 128 à 384 kbit/s en réception et 64 à 128 kbit/s en émission
  - Version 5 et 6 (3G\*+ 2010): 7 à 14 Mbits/s en réception, 5,8 en émission
  - Version 7 et 8 (2012): 21, 42, 84 Mbits/s (multiantennes) en réception

## Normes Réseaux cellulaires : la 4G

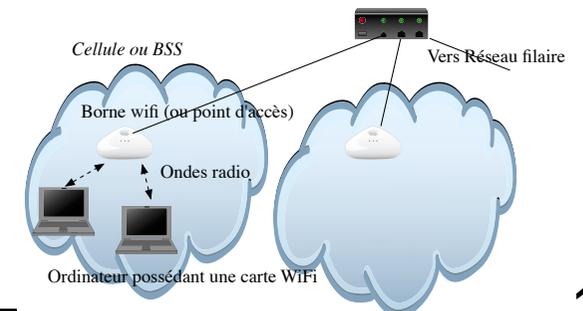
- Différentes Normes 4ème génération: LTE, WIMAX, LTE-Advanced
- En France: Bande de fréquence 2600 Mhz et 800 Mhz (ancienne plage de télé analogique).
- Plages de fréquence vendu par l'état français aux 4 opérateurs en 2011 pour 3,5 milliards d'Euros
- 100 Mégabit/s à 1 gigabit/s à partager entre les utilisateurs (comme le WIFI)
- En pratique 10 à 100 mégabits par utilisateur
- En déploiement en France depuis juin 2012.
- Utilise la téléphonie sur IP

## Normes Réseaux cellulaires : la 5G

- En cours de déploiement en Europe
- Débit annoncé jusqu'à 100 fois plus que la 4G
- Gros enjeux sociétaux (travail, santé, objets communicants...)
- Nombres d'antennes en forte augmentation
- Des études autour de la santé et de l'impact sur l'environnement en cours
- En 2020, moratoire sur l'arrêt du déploiement des antennes par les Suisses lancé en Avril 2019

## Les réseaux locaux sans-fil

- **Wi-Fi (Wireless Fidelity), Ethernet sans fil (protocole similaire)**
  - norme IEEE 802.11 / débits théoriques :
    - 1999: 802.11b: 11 Mégabit/s,
    - 2003: 802.11g: 54 Mégabit/s,
    - 2008: 802.11n: 450 Mégabit/s (passage au 5 GHz)
    - Depuis 2014: 802.11ac: 1,3 gigabits/s
  - Infrastructure WiFi avec borne d'*accès*



## Principe WI-FI

- Pas d'antenne directionnelle
- Chaque borne émet sur une plage de fréquence différente (14 canaux)
- Emission périodique de paquet de signalisation
- Parcours par les cartes WIFI des plages et choix en fonction de la qualité de réception
- Infrastructure sans borne d'accès possible: Réseau Ad Hoc
  - Les machines hôtes servent de routeurs entre elles
  - Infrastructure du réseau dynamique

## Débit WI-FI

- **Débit effectif dépend :**
  - De la distance: autoréglage du débit en fonction du taux d'erreur (obstacle, bruit ambiant...)
  - Du nombre d'utilisateurs : collisions (protocole adéquat)
- **Exemples**
- **Norme: 802.11n (Distance max 250m)**
  - Débit théorique de 450 Mbit/s, Débit effectif 100 Mbit/s à 90 m
- **Norme 802.11ac**
  - Débit théorique de 1,3 Gigabit/s, Débit effectif 900 Mbit/s à 50 m
- Se dégrade fortement dans un bâtiment suivant sa structure (dalles, murs épais..). Distance de 20 à 30m

## Bluetooth

- Connexion d'appareils numériques : téléphone, caméra, appareil photos, imprimantes, système d'alarme, ordinateurs
- Porté : 10 m à 100 m (suivant la puissance), en général 10 à 15 m
- **Développé pour de la faible consommation**
- Plage de fréquence de 2,4 GHz (Interférence avec le WiFi)
- Normes (802.15):
  - » Version 1 (1999): 1 Mégabits/s
  - » Version 2.0 (2004) : 2 Mégabits/s
  - » Version 3.0 (2009) jusqu'à 24 Megabit/s (version HS données transmises via le WIFI)
  - » Version 4.0 puis 4.1 (2013): 1 Mégabits/s mais Consommation en très forte baisse
  - » Version 4.2 (2014): compatibilité IPv6
  - » Version 5 (fin 2016): 24 Mégabits/s ; fois 2 sur la portée

## Internet des objets

- Peut utiliser les réseaux 4G ou 5G, mais aussi des réseaux radio particuliers moyenne distance (jusqu'à 30 km)
  - » Très faible consommation
  - » Grande autonomie : plusieurs années
  - » Débit et volume de donnée échangée faibles
  - » Plusieurs technologies existantes:
  - » Lora, SigFox, ...
- Nombreuses applications: santé, industrie, agriculture...
  - » Relevé de Compteur d'eau, ville intelligente, centrale météo, domotique intelligente, surveillance du bétail, surveillance liée à la santé....

## Satellites géostationnaires

- 36 000 km : Temps de propagation de 0,27s (aller-retour)
- Utilisé pour les lignes internationales du téléphone
- Problème du temps de propagation
- Intérêt
  - Pour point isolé (îles ...)
  - Pour accéder facilement (directement) à du haut débit
  - Pour application mobile
- Nombreuses offres sur le territoire français
  - Station bi-directionnelle fournie et installée : ~400 Euros
  - 40 (Réception) / 2 (Emission) Mbit/s illimité pour 30 Euros/mois



## Satellites américains

- Projet Starlink de la société SpaceX qui lance ses premiers satellites de télécommunications courant 2019
- 500 km de distance pour une baisse du temps de propagation (moins de 2 ms au lieu des 250 ms pour un géostationnaire)
- Jusqu'à 1 gigabit/s par utilisateur, ~80 euros par mois + l'installation
- Déployé en 2020: un millier de satellites
- Prévoit d'étendre le service au reste de la planète à l'aide de 16 000 satellites
- Première offre en Europe en janvier 2021

