

La topologie du réseau, c'est-à-dire la localisation des nœuds et l'agencement des liens entre ces nœuds, peut être très variée.

La connexion physique d'une machine à un réseau local nécessite une carte électronique, dénommée aussi **coupleur** (NIC : *Network Interface Card*) ou **carte réseau**.

Au niveau du réseau, deux architectures se distinguent :

- l'architecture **client-serveur** : une machine au sein du réseau (le serveur) a un rôle particulier dans la gestion de la communication. Il est possible d'avoir plusieurs serveurs sur un même réseau, chaque serveur ayant alors une attribution particulière qui est souvent basé sur un type d'application.
- l'architecture sans serveur : toutes les stations du réseau ont le même rôle. Elle peuvent toutes communiquer directement entre elles. Cela n'est envisageable que pour les petits réseaux : au-delà d'une douzaine de postes, la communication dans tous les sens, sans point central, devient difficile à gérer.

1.2. Débits

Il existe plusieurs unités pour mesurer les **débits**, c'est-à-dire la quantité de données numériques transmises par seconde. Ils s'expriment en bit par seconde (bit/s ou bps) kilobit par seconde (Kbit/s), mégabit par seconde (Mbit/s ou Mb/s), gigabit par seconde (Gb/s) voire téra-bit par seconde (Tb/s) sur des réseaux spécialisés ou expérimentaux.

Des débits de 100 Mb/s ou 1 Gb/s sont couramment atteints sur les réseaux locaux, alors que les épines dorsales de réseau (*backbone*) atteignent quant à elles 10 Gb/s.

Attention : 1 Ko = 1024 x 8 bits = 8192 bits soit environ 8 Kb

1.3. Transmission de l'information

Le but d'un réseau est d'échanger des informations d'une entité à une autre via un canal de transmission. La transmission entre deux entités communicantes est caractérisée par :

- le **sens des échanges**
 - unidirectionnel
 - bidirectionnel à l'alternat ou simultané
- le **mode de transmission**
 - en série
 - en parallèle
- la **synchronisation**
 - mode synchrone
 - mode asynchrone

Pour que l'échange des données fonctionne :

- un *codage* des signaux de transmission doit être choisi
- des règles communes régissant la communication doivent être adoptées (notion de *protocole*)

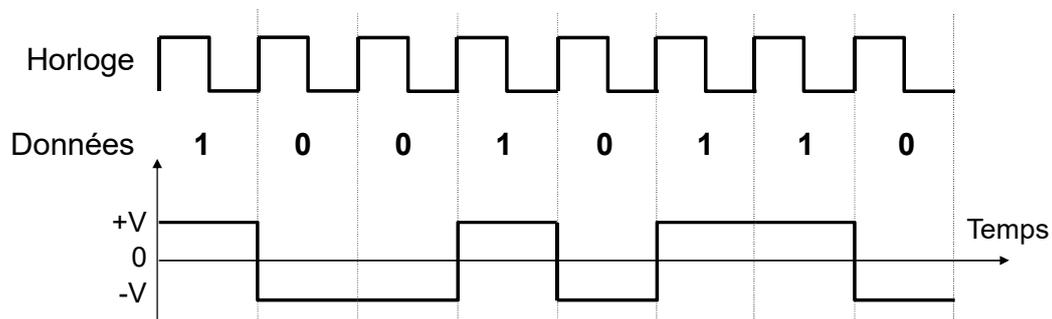
Il existe 3 grands types de supports physiques :

- les supports **filaires** : ils permettent de faire circuler une grandeur électrique sur un câble métallique.

- les supports **aériens** : ils désignent l'air ou le vide et permettent la circulation d'ondes électromagnétiques ou radioélectriques (onde électromagnétique de fréquence inférieure à 3000 GHz) diverses.
- Les supports **optiques** : ils permettent d'acheminer des informations sous forme lumineuse.

1.3.1. Codage des signaux

Les bits à transmettre doivent être représentés sous forme de signaux électriques. La méthode la plus simple est de considérer qu'un courant nul (ou négatif) indique un 0 et un courant positif un 1. C'est la méthode dite *transmission en bande de base*. Le signal généré est en forme de créneaux, et est appelé aussi *signal carré*.

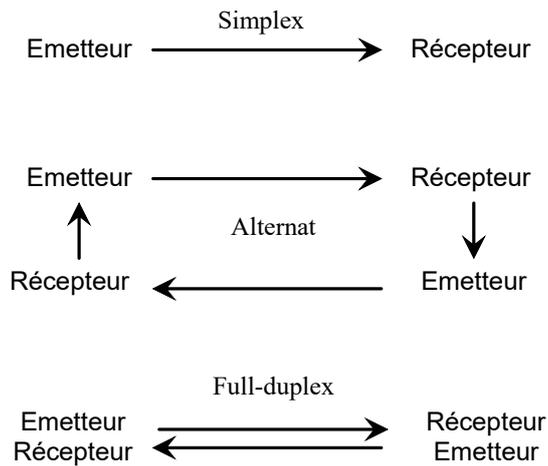


- L'avantage de ce type de signal est qu'il est facile à réaliser. Il ne demande que des équipements simples et peu coûteux, que ce soit à l'émission ou à la réception.
- L'inconvénient majeur : ces types de signaux sont sujets à une dégradation (atténuation) très rapide en fonction de la distance parcourue.

1.3.2. Sens de transmission

Il existe différentes possibilités de sens de transmission entre deux points :

- **mode simplex** : la transmission est unidirectionnelle, de l'émetteur vers le récepteur (exemples : diffusion radio et TV).
- **mode semi-duplex** [*half duplex*] ou **bidirectionnel à l'alternat**, permet une transmission dans les deux sens mais alternativement (jamais simultanément).
- **mode duplex** [*full duplex*] ou **bidirectionnel simultané** permet une transmission simultanée dans les deux sens.

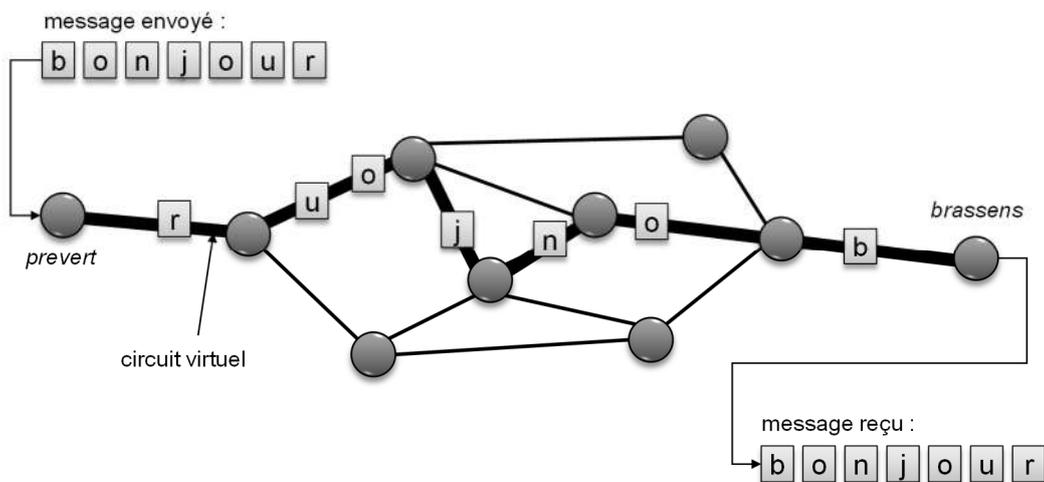


1.3.3. Mode d'acheminement

Deux modes sont possibles pour la communication entre deux entités :

1.3.3.1. Le mode avec connexion

En mode **connecté** une entité ne peut émettre d'informations sans avoir, au préalable, demandé à son homologue avec lequel elle veut communiquer, la permission de lui envoyer les blocs d'informations. Le récepteur a le choix d'accepter ou de refuser la connexion.



Le mode avec connexion fait appel à 3 phases distinctes :

- négociation et établissement de la liaison entre les deux entités
- transfert des données de l'utilisateur d'une entité à l'autre en utilisant le chemin fixé (circuit virtuel)
- libération de la connexion (suppression du circuit virtuel précédemment créé).

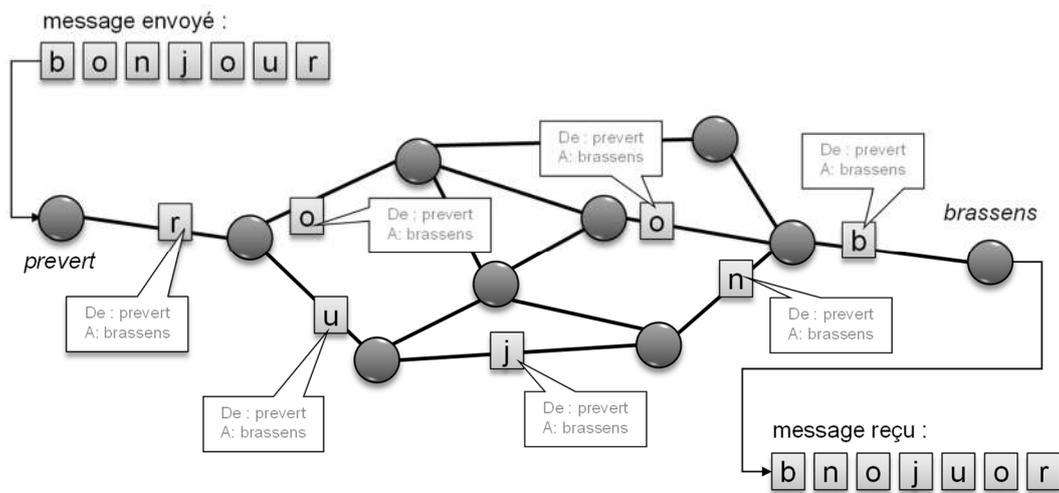
L'avantage de ce mode réside dans la **sécurisation du transport de l'information** : les émetteurs et récepteurs se mettent d'accord de telle sorte que l'ensemble de l'activité du réseau est contrôlable facilement du moins au niveau des nœuds extrémités. Ils peuvent de plus, au moment de la connexion, échanger des paramètres pour équilibrer la transmission : c'est la négociation de la **qualité de service** ou QoS (*Quality of Service*).

Les défauts :

- la lourdeur de cette mise en œuvre : même pour envoyer quelques octets, il faut mettre en place une connexion
- les accès à des applications multipoints seront difficiles à mettre en œuvre : il faut ouvrir autant de connexions que de points à atteindre (pour diffuser un fichier vers 1 000 utilisateurs distants, il faudra ouvrir 1 000 connexions)

1.3.3.2. Le mode sans connexion

Dans le mode **sans connexion**, les blocs de données sont émis sans avoir à s'assurer au préalable que l'entité distante est bien présente.

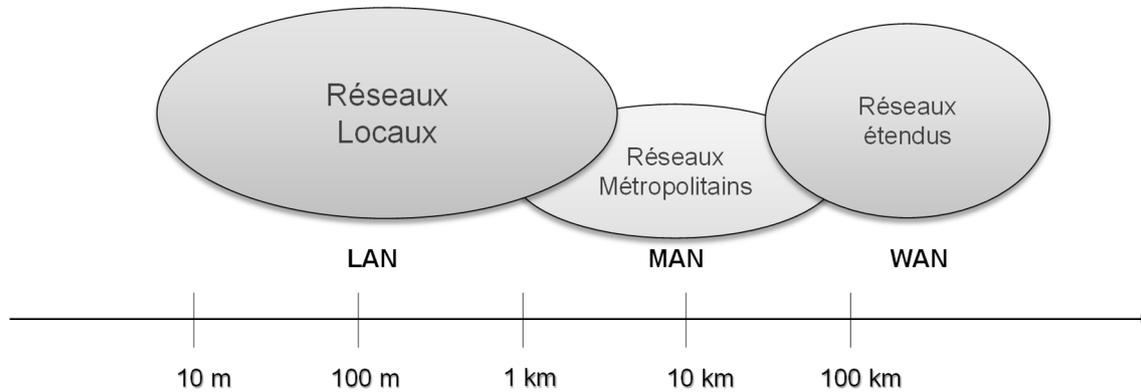


Chaque message comporte **l'adresse de l'émetteur** et **l'adresse du destinataire** et est transporté indépendamment de tous les autres. Les messages peuvent arriver dans le désordre. Ce mode est plus intéressant pour le transport des messages courts.

1.4. Classification des réseaux

On distingue les réseaux filaires des réseaux sans-fil (*Wireless*).

1.4.1. Les réseaux filaires



LAN : *Local Area Network*
MAN : *Metropolitan Area Network*
WAN : *Wide Area Network*

1.4.1.1. LAN

- Les réseaux locaux ou **LAN** (*Local Area Network*) permettent de raccorder entre eux les ordinateurs d'un bâtiment, voire d'un site (d'où le terme « local »).
- Les LAN, constitués des éléments actifs, du câblage et des interfaces dans les postes de travail, sont presque toujours la propriété de la société utilisatrice \Rightarrow domaine privé.
- Leurs débits vont de 100 Mbit/s jusqu'au Gbit/s.
- Ethernet (IEEE 802.3) est la technologie LAN la plus répandue aujourd'hui. Autre technologie : Token-Ring (IEEE 802.5)

1.4.1.2. MAN

- Les réseaux métropolitains ou **MAN** (*Metropolitan Area Network*) offrent une couverture géographique théoriquement de l'ordre de la dimension d'une grande ville ou d'une plaque régionale (\approx 100 km).
- Ils permettent d'interconnecter plusieurs LAN. Les MAN se situent entre le secteur privé et le secteur public. Les réseaux FDDI et ATM composent cette catégorie.

1.4.1.3. WAN

- Les réseaux longue distance ou **WAN** (*Wide Area Network*) se situent à l'échelle d'une région, d'un pays, d'un continent et de la planète.
- Ils peuvent être terrestres (essentiellement des grands réseaux de fibre optique) ou hertziens (réseaux satellite)

- Le WAN est aujourd'hui systématiquement loué à l'entreprise par une entité opérateur, national ou international. C'est ce qui, hormis les caractéristiques techniques concernant les distances, le différencie totalement du LAN.

1.4.2. Les réseaux sans fil

1.4.2.1. WPAN

Les tout petits réseaux sans fil ou **WPAN** (*Wireless Personal Area Network*), d'une portée d'une dizaine de mètres, sont présents sous différents noms :

- Bluetooth (norme 802.15.1) : on trouve les composants Bluetooth dans beaucoup d'ordinateurs portables et de nombreux périphériques (appareils photos, téléphones portables, assistants personnels ...). Ils se caractérisent par une faible consommation et offrent un débit de 1 Mb/s et une portée d'environ 30 mètres.
- ZigBee (norme 802.15.4).

1.4.2.2. WLAN

Les réseaux locaux sans fil, souvent appelés **WLAN** (*Wireless Local Area Network*) ou encore Réseau Local Radioélectrique (RLR) sont en pleine expansion.

D'une portée de l'ordre de quelques centaines de mètres, ils peuvent atteindre des débits de plusieurs Mbit/s, voire de plusieurs dizaines de Mbit/s.

Plusieurs gammes de produits sont actuellement commercialisées avec succès, le standard dominant étant aujourd'hui le 802.11b de l'IEEE avec sa version labélisée Wi-Fi.

Les RLR ne visent pas à remplacer les réseaux filaires et offrent d'autres avantages :

- la **mobilité** : un utilisateur peut accéder aux services réseaux sans avoir à être physiquement relié au réseau.
- une **simplicité d'installation** : ils peuvent être facilement déployés car ils ne nécessitent la mise en place d'aucun câblage.
- une **topologie flexible** facilement modifiable dans le temps en fonction des besoins.
- des **coûts** d'installation et de maintenance pratiquement nuls.
- une **interconnectivité** avec les réseaux locaux existants (Wi-Fi et Ethernet coexistent sans problème dans le même environnement).
- la **fiabilité** : les transmissions sans fil ont prouvé leur efficacité dans les domaines civil et militaire.

1.4.2.3. WMAN

Les **WMAN** (*Wireless Metropolitan Area Network*) sont des réseaux à la taille d'une métropole, et d'une portée de quelques kilomètres. On parle plutôt dans ce cas de boucle local radio, ou BLR.

Ils sont basés sur le standard IEEE 802.16, mais mieux connus sous le label WiMax. Ils offrent des débits en nomade ou stationnaire jusqu'à 1 Gbit/s et 100 Mbit/s en mobile grande vitesse (802.16m). Leur technologie est principalement destinée aux opérateurs de télécommunication.

1.4.2.4. WWAN

Les réseaux étendus sans fil, ou **WWAN** (*Wireless Wide Area Network*), ont une portée de plusieurs centaines de kilomètres. Il s'agit là de la taille globale du réseau plutôt que de la

distance entre le terminal et l'antenne. Un tel réseau est obtenu par un ensemble de cellules qui recouvre la surface que souhaite desservir un opérateur.

Bien qu'inconnus sous cet acronyme, ce sont aujourd'hui les réseaux sans fil les plus utilisés en France (GSM, GRPS, 3G, 4G, 5G).

1.5. Normalisation

1.5.1. Les organismes de normalisation

Les organismes de normalisation ont pour rôle de définir un cadre de développement et d'évolution des technologies, souvent nommé **modèle**, et de garantir la complétude et l'intégrité des spécifications.



En français, il existe une distinction entre la norme (établie par un organisme dont c'est officiellement le rôle) et le standard, que l'on dit aussi standard de fait (ou defacto standard en anglais) parfaitement comparable mais rédigé par une entité non reconnue, et avec des engagements de pérennité parfois plus limités.

Parmi les organismes officiels de normalisation pour le domaine des réseaux, on trouve principalement :

- l'ISO (*International Standardization Organization*) : organisation non gouvernementale qui regroupe les organismes nationaux de normalisation, en France l'AFNOR
- l'UIT-T (*Union Internationale des Télécommunications*) ex CCITT jusqu'en 1993 : dépend de l'IUT qui est une organisation internationale intergouvernementale. Il a en charge les télécommunications sur câbles. Il a trait à tout ce qui concerne les liaisons à distance.
- IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) : société internationale qui est un des organismes les plus actifs dans le domaine des réseaux locaux.

1.5.2. Le modèle OSI

Le modèle OSI (*Open System interconnection* : IS 7498 - 1983) de l'ISO résulte

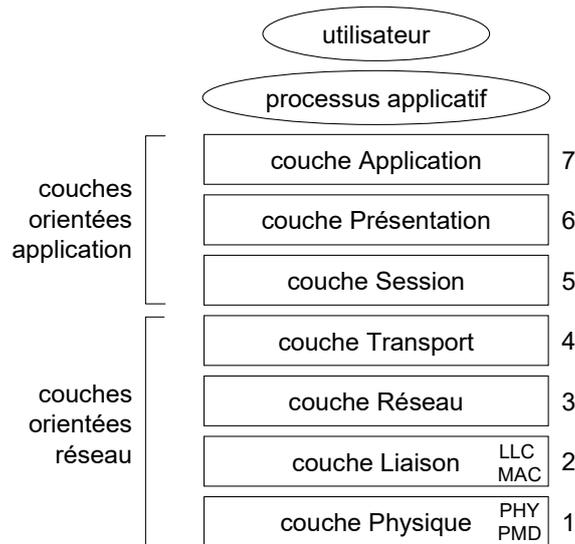
- de la tendance à la stratification dans les systèmes de communication (modèle en couches)
- d'une volonté de normalisation dans un domaine où les grands constructeurs informatiques agissaient de façon indépendante

L'objectif poursuivi était double :

- permettre à l'utilisateur de modifier dans le temps son infrastructure en ne remplaçant que le ou les modules (logiciels ou matériels) nécessaires
- autoriser l'utilisateur à se procurer les modules constitutifs de son architecture chez différents fournisseurs

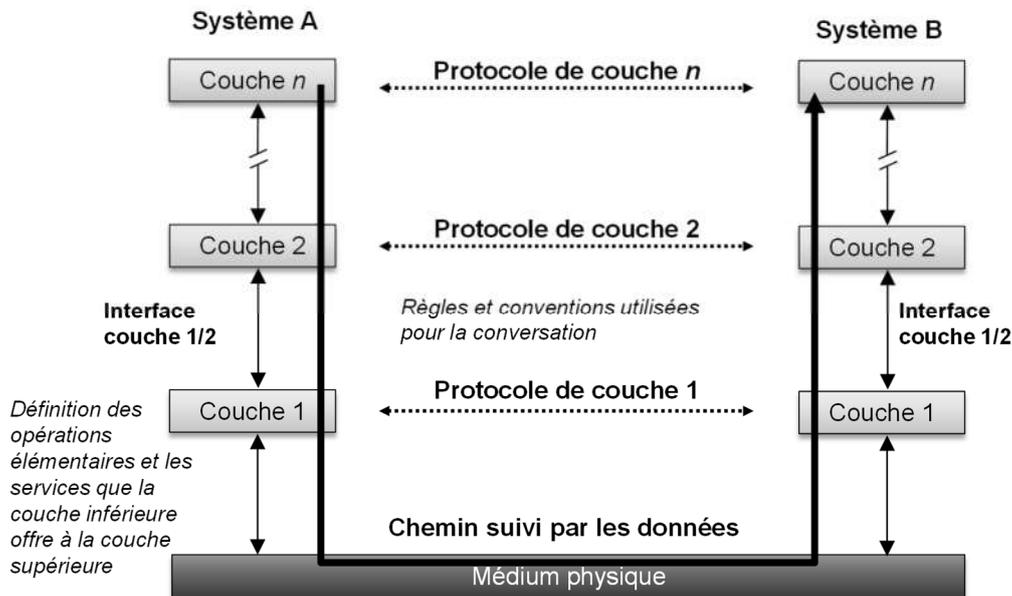
Pour les constructeurs et éditeurs, cela leur permet de bâtir des systèmes plus souples, en évitant l'aspect monolithique des anciennes architectures.

Il s'agit d'un **modèle d'architecture** de réseau qui propose une **norme** pour le **nombre**, le **nom** et la **fonction** de chaque couche. Le modèle OSI est ainsi découpé en 7 couches, dont seules les quatre plus basses concernent le réseau à proprement parlé. Les couches supérieures sont plus orientées utilisateur et programme.



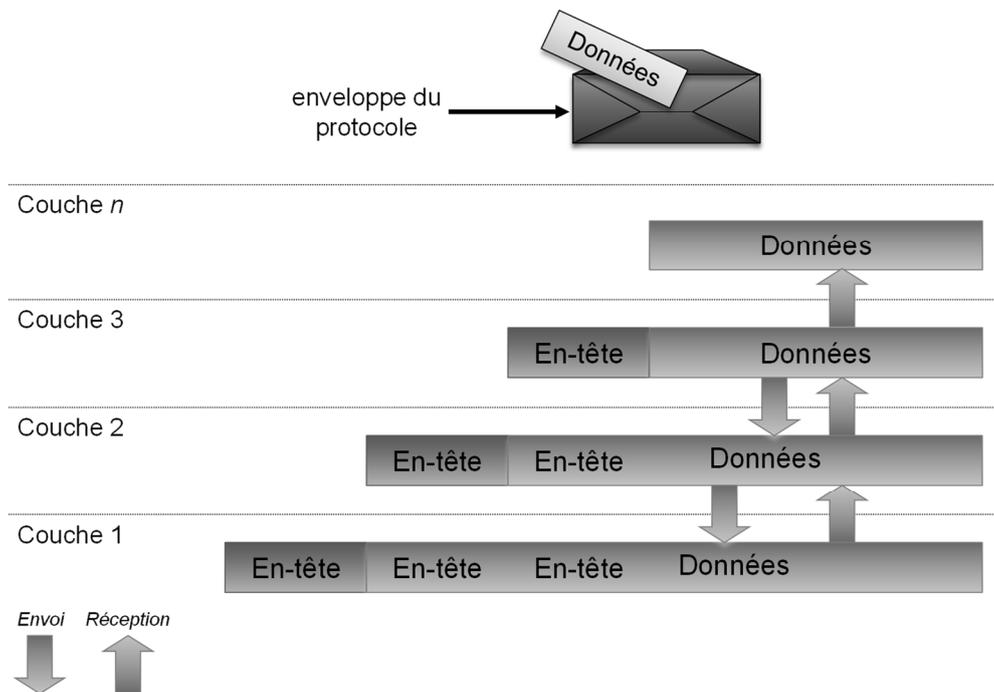
Chaque couche est identifiée par son niveau N, et réalise un sous-ensemble de fonctions nécessaire à la communication avec un autre système. Chaque couche possède une **interface** standard avec ses deux voisins. Elle offre un ou des services à la couche supérieure via des **SAP** (*Service-Access Point*).

La couche N fournit des requêtes à la couche N – 1, laquelle lui répond par des confirmations. Inversement, la couche N reçoit des indications de la couche N + 1, et renvoie des réponses.

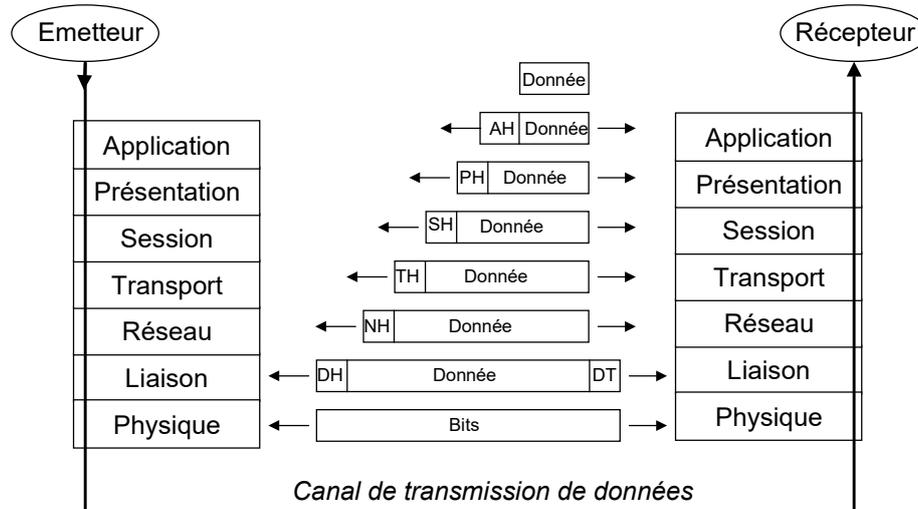


La couche de niveau *n* de la machine A ne communique qu'avec la couche de niveau *n* de la machine B. C'est ce que l'on appelle le **protocole de communication**. Le protocole regroupe l'ensemble des règles régissant tous les aspects de la communication ; il doit prévoir le traitement de tous les cas possibles.

Les données sont transmises de haut en bas lors de leur envoi sur le réseau, et de bas en haut lors de leur réception à partir du réseau.



A l'émission, des informations de contrôle de protocole (en-tête / en queue) sont utilisées comme enveloppe par chaque couche : c'est ce que l'on appelle **l'encapsulation**. A la réception, ces informations de contrôle sont supprimées à mesure que les données remontent dans les couches.



- AH : En-tête d 'application (*Application Header*)
- PH : En-tête de présentation (*Presentation Header*)
- SH : En-tête de session (*Session Header*)
- TH : En-tête de transport (*Transport Header*)
- NH : En-tête de réseau (*Network Header*)
- DH : En-tête de liaison de données (*Data Header*)
- DT : Délimiteur de fin de trame (*Data Trailer*)

1.5.2.1. La couche Application (couche 7)

La couche 7, application, est l'interface utilisateur pour les fonctions de communication. Les plus importantes de ces fonctions sont :

- le transfert de fichiers : un protocole très utilisé est le FTP (*File Transfert Protocol*) issu de la communauté Internet.
- la messagerie électronique
- l'émulation de terminal virtuel : cette fonction permet à une machine du réseau de se connecter sur une autre machine et d'apparaître pour celle-ci comme un simple terminal clavier-écran.

1.5.2.2. La couche Présentation (couche 6)

La couche 6, présentation, s'occupe essentiellement du mode de représentation des données : formalisme interne vers la couche 5 et formalisme externe vers la couche 7.

La compression des données fait partie de la couche 6. Dans la pratique, la compression des données ne se situe pas au niveau de la couche 6, mais est rajoutée à des matériels de couche 2, 3 ou 4.

Le chiffrement des données peut être réalisé au niveau des couches physiques, transport ou présentation. Le chiffrement dans la couche physique permet de sécuriser tout le contenu des informations (données, en-têtes, adresses ...) A l'inverse, le chiffrement au niveau présentation autorise une application plus fine : ne sont codées que les données sensibles.

Les techniques de chiffrement sont multiples. Une est d'usage courant : le DES (*Data Encryption Standard*), défini par IBM à la fin des années 70.

1.5.2.3. La couche Session (couche 5)

La couche 5, session, est la première couche qui établit une communication formelle avec son homologue de la station de destination.

Comme pour la couche 6, les systèmes les plus courants n'utilisent pas la couche session. Les protocoles de la communauté Internet accèdent ainsi directement à la couche transport.

1.5.2.4. La couche Transport (couche 4)

La couche 4, transport, joue un rôle capital dans le processus de communication. Elle s'occupe de la **fiabilité du transfert** d'informations entre émetteur et récepteur, indépendamment de la nature et du service des couches inférieures.

Elle assure le **transport des données de bout en bout**, c'est-à-dire de l'émetteur vers le destinataire. Elle ne s'occupe pas des relais intermédiaires que les données vont éventuellement traverser.

La couche transport assure une qualité de services (QoS) en fonction des possibilités des couches inférieures.

Deux fonctionnements sont possibles :

- **mode connecté**
- **mode non connecté.**

La complexité de cette couche est fonction des services offerts par la couche 3.

1.5.2.5. La couche Réseau (couche 3)

Son rôle est d'acheminer les données du système source au système destination quelle que soit la topologie du réseau de communication existant entre les deux. C'est la plus basse couche concernée par la transmission de bout en bout. Deux techniques sont possibles :

- le **mode connecté** utilisant les **circuits virtuels**
- le **mode sans connexion** utilisant les **datagrammes** (paquets de données indépendants les uns des autres)

Le choix d'une technique a des conséquences sur la couche transport. Ainsi, un mode datagramme impose une couche transport capable de ré-ordonner les paquets.

La couche réseau assure le **roulage** (acheminement) des paquets via des routes.

Elle gère les problèmes d'**adressage** dans l'interconnexion de réseaux hétérogènes, et assure la **traduction** entre adresses physiques et logiques : la couche réseau utilise des adresses logiques définies par l'administrateur du réseau. La couche 2, quant à elle, utilise des « adresses physiques » qui sont définies à la construction des matériels et qui sont figées. La couche réseau doit assurer la liaison entre ses propres adresses logiques et les adresses physiques de la couche 2.

Sa complexité est dépendante de la topologie du réseau

1.5.2.6. La couche Liaison de Données (couche 2)

La couche 2, Liaison de Données, (*Data Link*) achemine les données reçues de la couche supérieure (réseau) en les organisant en blocs de transmission : les **trames**. Une trame est constituée d'un en-tête et d'un délimiteur de fin

Elle gère également les problèmes posés par les trames endommagées, perdues ou dupliquées (les *Contrôles de Redondance Cycliques* permettent de détecter les erreurs de modification d'un ou plusieurs bits).

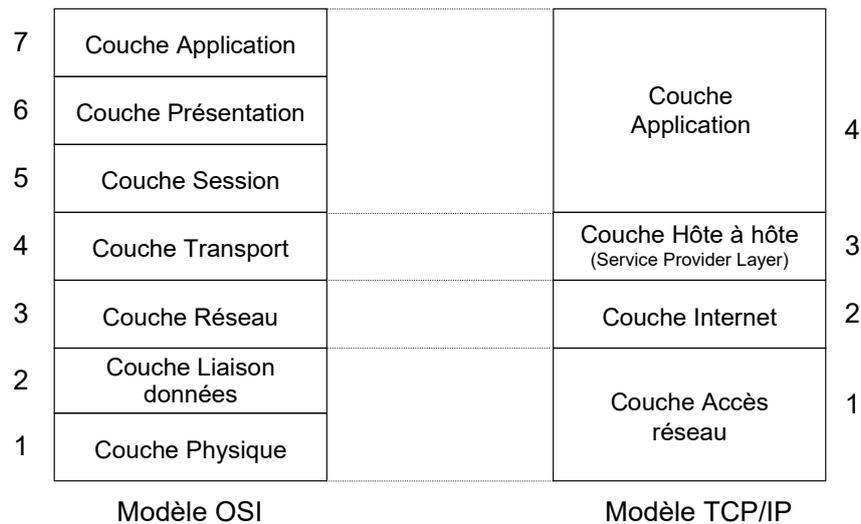
1.5.2.7. La couche Physique (couche 1)

Cette couche spécifie les caractéristiques physiques propres à la transmission du signal. Il s'agit :

- d'une part du codage, des procédures de détection de la présence d'un signal, de la gestion des horloges, de la synchronisation
- d'autre part des valeurs significatives concernant le média, des paramètres électriques ou optiques et mécaniques relatifs aux liaisons et à la connectique.

1.5.3. Le modèle TCP/IP

Parallèlement aux travaux de l'ISO, le Département de la Défense des Etats-Unis (DoD) a, pour ses besoins propres, initié le développement d'une famille modulaire de protocoles dans le cadre du projet DARPA (*Defense Advanced Research Project Agency*) : celle-ci est généralement connue sous l'appellation de TCP/IP en faisant référence à ses protocoles Transport et Réseau de base.



1.5.4. Les normes de l'IEEE

Deux organismes ont particulièrement contribué aux travaux dans le domaine des réseaux locaux :

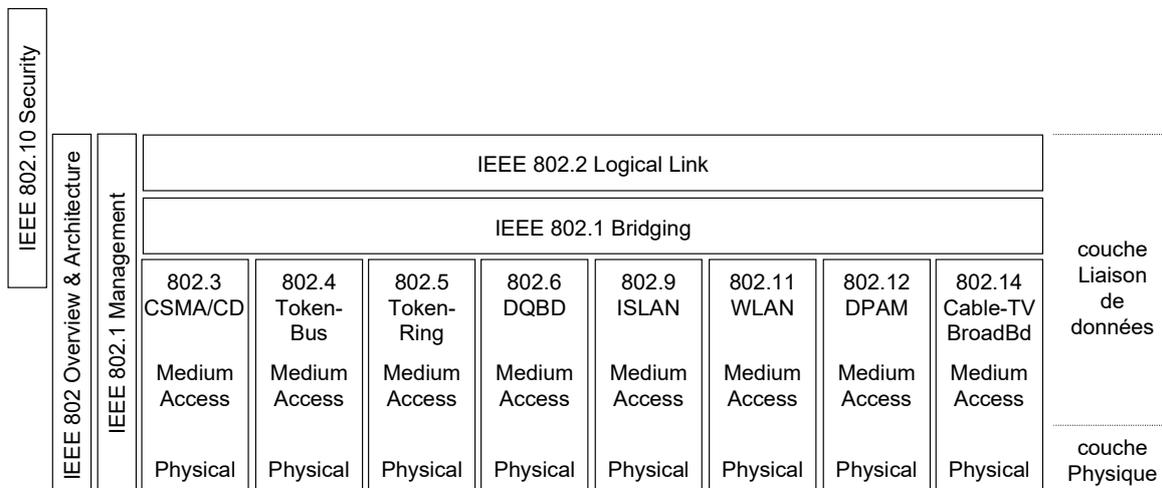
- l'IEEE (*Institute of Electricians and Electronics Engineers*), aux Etats-Unis
- l'ECMA (*European Computer Manufacturers Association*) en Europe

Leur but : produire un ensemble de normes dans le domaine des réseaux locaux afin d'assurer la compatibilité entre des équipements provenant de différents fabricants.

En février 1980, l'IEEE a créé un comité de travail, le comité 802, dédié à l'étude, puis à la standardisation de spécifications pour les réseaux locaux. Celui-ci s'est tout d'abord concentré sur les trois principales technologies constructeur, et les a reprises dans un meilleur respect du modèle ISO. Trois standards LAN ont été produits :

- 802.3 pour Ethernet
- 802.4 pour MAP
- 802.5 pour Token-Ring

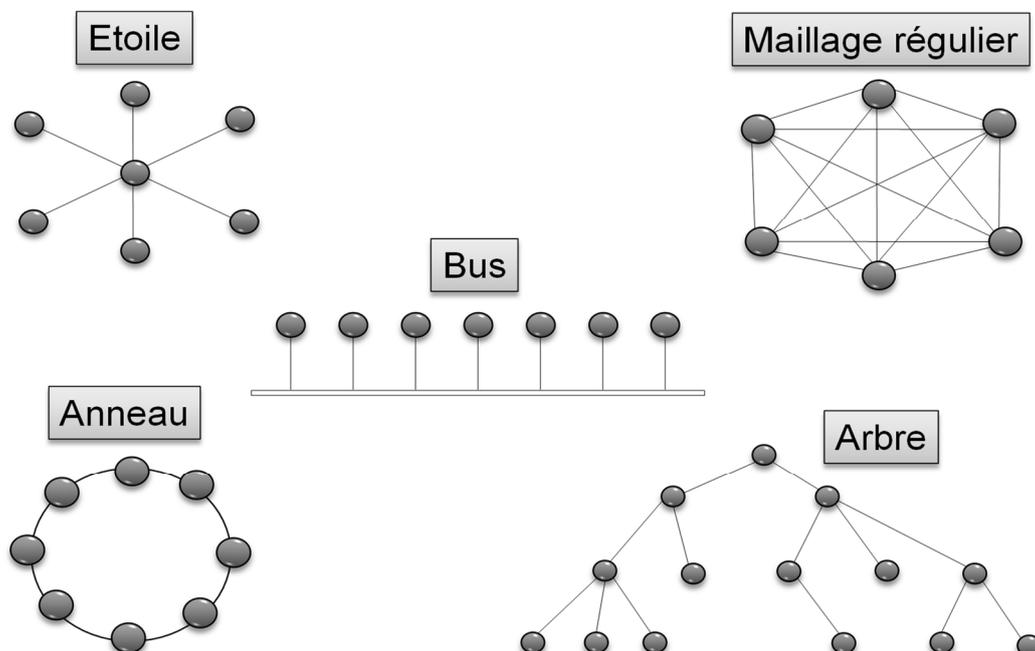
Liste des principaux comités IEEE 802 :



Les « standards » de l'IEEE peuvent être mis à jour ou complétés par des suppléments spécifiques : ces documents complémentaires sont identifiés par une lettre suivant le numéro du comité.

Les spécifications des LAN correspondent aux couches 1 et 2 du modèle OSI. Ils occupent également la couche basse dans le modèle TCP/IP.

1.6. La topologie



1.6.1. L'étoile

L'étoile est constituée d'un élément central raccordé à plusieurs éléments périphériques par autant de liaisons (rayons).

C'est une topologie

- assez coûteuse (en terme de câblage puisqu'il existe $N - 1$ chemins pour N équipements)
- dissymétrique, puisque le cœur de l'étoile a une position particulière : il est appelé *hub* (moyeu) ou **concentrateur** quand il correspond à un point de rapatriement des accès.

1.6.2. L'anneau

L'anneau est composé d'un chemin bouclé sur lequel sont connectés les différents éléments du réseau. Il existe donc un **ordre** de circulation implicite des informations, et les éléments sont atteints **successivement** (circulairement).

1.6.3. Le bus

Le bus correspond à la **mise en parallèle** de tous les accès au réseau. Il n'y a, à priori, pas d'ordre dans les éléments. Comme il n'y a véritablement qu'un seul média partagé, le débit réel global sur un bus est nécessairement limité par la bande passante du média.

1.6.4. La chaîne

La chaîne est un chemin reliant successivement tous les accès. La chaîne circule donc de station en station, et implique un **séquencement** implicite dans les accès. Le cheminement s'arrête aux deux extrémités (si la chaîne bouclait, elle formerait un anneau).

1.6.5. L'arbre

L'arborescence est décrite selon une structure d'arbre, avec des branches qui se divisent et se subdivisent en partant de la racine (unique), sans jamais créer de boucle.

Il s'agit d'une topologie particulièrement riche, puisqu'elle peut intégrer différents niveaux hiérarchiques et une structure élaborée.

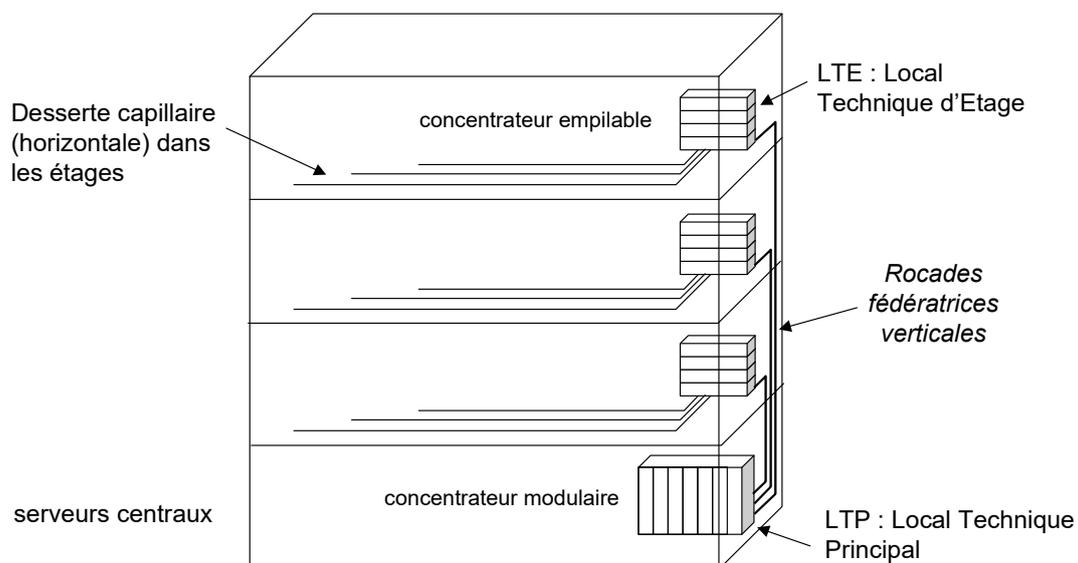
1.6.6. Le maillage

Le maillage est une topologie simple, où les éléments sont reliés par couple par des liaisons en point à point. C'est la topologie la plus coûteuse puisqu'il existe un chemin physique pour chaque communication possible.

Quand tous les éléments sont ainsi reliés par couple, la topologie est dite complètement maillée.

Ces topologies ont chacune des qualités et des défauts, mais le câblage systématique des bâtiments qui se fait nécessairement en étoile, oriente les utilisateurs vers les technologies adaptées.

Dans la pratique, les topologies mises en place sont composées à partir de sous-structures respectant une des topologies de base précédemment évoquées : les équipements actifs comme les répéteurs ou les concentrateurs, permettent de raccorder des segments d'un type donné, en étoile, ou en cascade d'étoiles (on génère ainsi des arborescences élaborées).



Par ailleurs, on peut être amené à dupliquer en partie la topologie pour des besoins de sécurisation ou de performances : double étoile, double anneau, double bus.

	étoile	anneau	bus	chaîne	arbre	maillage
symétrie	non	oui	oui	non	non	oui
ordre	non	oui	non	oui	non	non
directionnel	non	A priori	non	non	non	non
nombre de brins	$N - 1$	N	1	$N - 1$	$N - 1$	$N(N - 1)/2$
confidentialité	oui	non	non	non	possible	oui



Il faut faire une distinction importante entre la **topologie physique** et la **topologie logique**. La topologie *physique* décrit la façon dont le câblage est construit. La topologie *logique* décrit la façon dont les données circulent dans les câbles.

2. Aspects matériels des réseaux

2.1. Composants physiques des réseaux

Un réseau est constitué des éléments matériels suivants :

- un support physique d'interconnexion ou **média** : il permet l'acheminement des signaux transportant l'information.
- des **prises** (*tap*) : elles assurent la connexion sur le support
- des **adaptateur** (*transceiver*) : ils sont chargés notamment du traitement des signaux à transmettre (codage, ...)
- des **coupleurs** ou « cartes réseau » (NIC, *Network Interface Card*) : elles prennent en charge les fonctions de communication. La NIC se présente sous la forme d'une carte additionnelle enfichable dans la machine ou directement intégrée sur la carte mère.
- des **équipements spécifiques** tels que répéteur, hub ...

2.1.1. Les médias

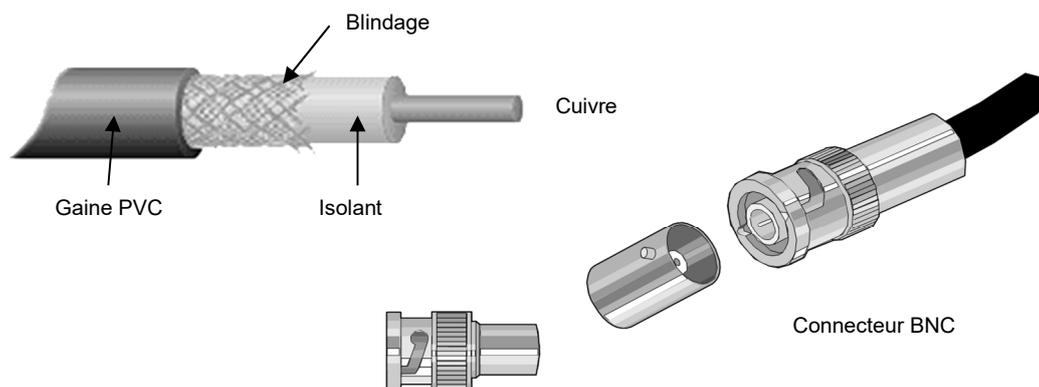
Il existe plusieurs types de médias :

- câbles métalliques :
 - câble coaxial
 - paire torsadée
- fibres optiques :
 - multimode à saut d'indice
 - multimode à gradient d'indice
 - monomode
- ondes radio et infrarouge

2.1.1.1. Les câbles métalliques

2.1.1.1.1. Le coaxial

Le câble coaxial est formé d'une *âme* en cuivre utilisée pour transmettre les signaux. Le retour du signal se fait par une gaine conductrice qui entoure l'âme, les deux étant séparées par un isolant.



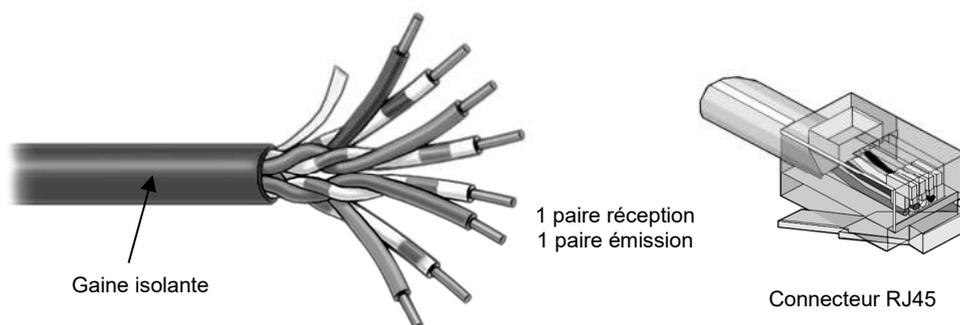
Les câbles coaxiaux offrent de bonnes performances en débit et en distance et bénéficient d'une bonne immunité aux interférences électromagnétiques.

Par contre leur coût est, comparativement à de la paire torsadée, plus élevé. Leur installation est souvent délicate ; ils offrent moins de souplesse de configuration et de connexion.

2.1.1.1.2. La paire torsadée

La dénomination « paire torsadée » signifie que les conducteurs sont groupés par 2 (parfois par 4) et vrillés ensemble. Les torsades permettent de diminuer :

- la sensibilité aux perturbations électromagnétiques ;
- l'atténuation du câble ;
- la paradiaphonie¹ entre paires



Ce type de câble est le plus courant en téléphonie et en informatique. Ils sont simples à installer et peu coûteux. Aujourd'hui les progrès technologiques ont rendu l'utilisation de la paire torsadée tout à fait possible pour des débits de 100 Mbit/s, voire 1 Gbit/s.

En revanche, les performances en distance sont médiocres et, malgré les torsades, le câble est sensible aux perturbations électromagnétiques.

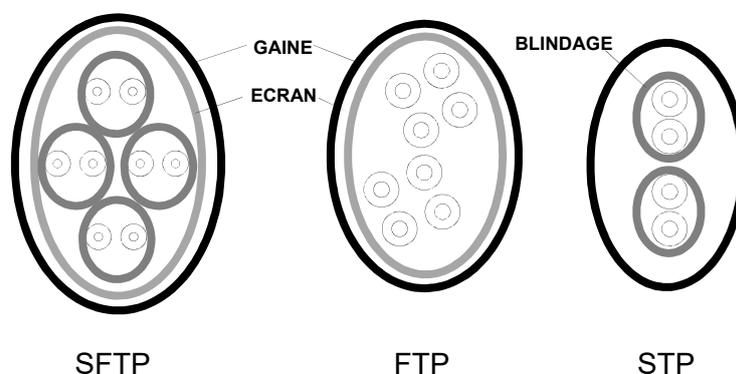
Il existe plusieurs types de paires de fils torsadés :

- les paires torsadées non blindées, non écrantées (UTP : *Unshielded Twisted Pair*)
- les paires torsadées blindées (STP : *Shielded Twisted Pair*)
- les paires torsadées écrantées (FTP : *Foiled Twisted Pair*)
- les paires écrantées et blindées (SFTP)

L'**écrantage** consiste à entourer toutes les paires d'un même câble d'une tresse métallique ou d'un feuillard fin en aluminium.

¹ La paradiaphonie mesure la quantité de signal parasité transmis d'une paire à une autre sur l'extrémité locale

Le **blindage** consiste à entourer chaque paire d'une tresse métallique ou d'un feuillard fin en aluminium.



Il existe deux méthodes de classification des composants et des liens.

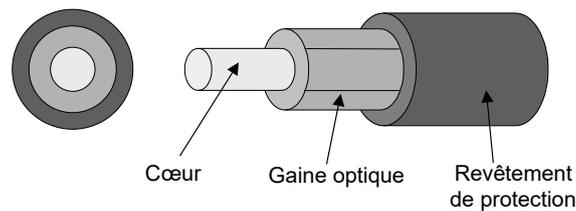
- Les **catégories** : elles correspondent aux performances des composants et sont éditées par l'EIA/TIA (*Electronic Industries Association/Telecommunications Industry Association*). Huit catégories numérotées de 1 à 8 ont été définies.
 - La catégorie 5E est une extension de la catégorie 5 supportant des fréquences de 100 MHz et des applications voix et données jusqu'à 1 Gbit/s.
 - Il existe 2 types de câble de catégorie 6
 - Le CAT6 standard : permet un signal de fréquence > à 250 MHz et une distance maximale de 55m en 10 Gigabit
 - Le CAT6 a (Augmenté) : fréquence de 500 MHz et distance maximale de 100m en 10 Gigabit
 - La catégorie 8 avec ses 2 variantes 8.1 et 8.2 supporte le 25 et 40 Gigabit.
- Les **classes** : elles permettent de caractériser un lien composé de différents composants (prises, connecteurs, câbles). Six classes sont définies actuellement, de A à F.

Vitesse	Câble compatible
40G	CAT8.2 (30 m)
	CAT8.1 (30 m)
10G	CAT7a (100 m)
	CAT7 (100 m)
	CAT6a (100 m)
	CAT6 (55 m)
1G	CAT5e (100 m)
100M	CAT5 (100 m)

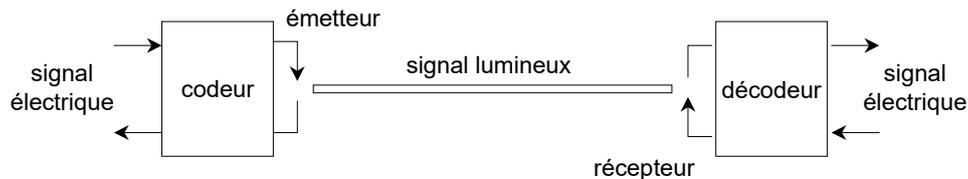
2.1.1.2. La fibre optique

Les câbles en fibre optique sont formés d'une fibre très fine en verre ou en plastique, entourée par une gaine protectrice. Le transport d'informations est réalisé par propagation d'ondes

lumineuses dans la fibre de verre. La propagation du rayon lumineux s'effectue par réflexion sur les parois de la fibre qui a un diamètre compris entre quelques dizaine de microns et quelques centaines de microns.



La présence ou l'absence d'un signal lumineux permet le codage d'un bit



On utilise une fibre pour chaque direction de la transmission.

Les émetteurs utilisés sont de trois types :

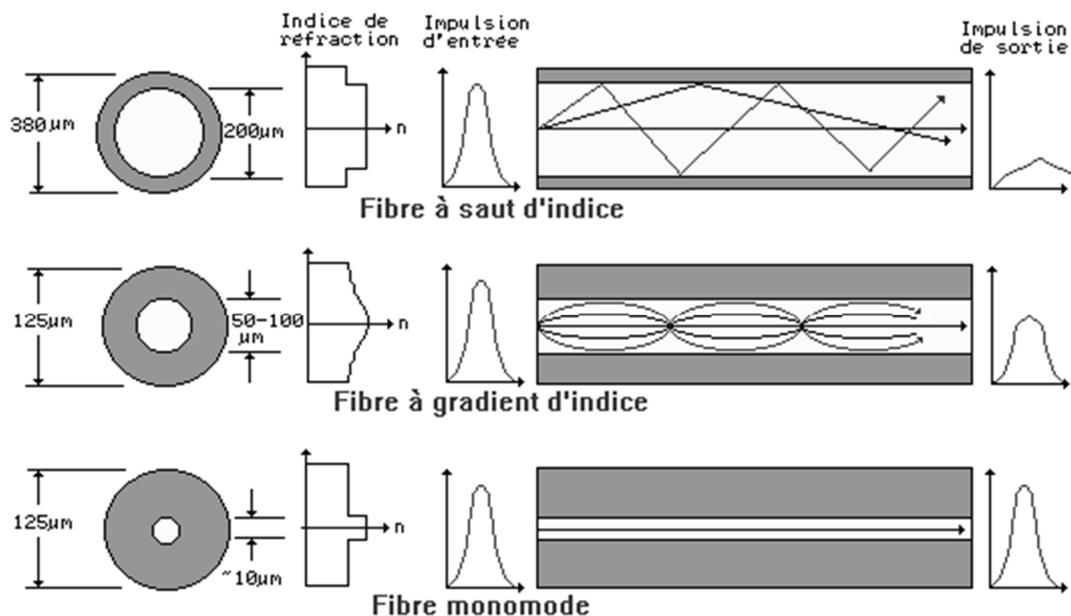
- les LED (*Light Emitting Diode*) qui émettent à 850 nm
- les diodes à infrarouge qui émettent dans l'invisible à 1300 nm
- les lasers, utilisés pour la fibre monomode, dont la longueur d'onde est 1300 ou 1550 nm



La lumière visible se situe entre 380 et 750 nanomètres

On distingue 3 catégories de fibres selon leur type de propagation de la lumière :

- La **fibre à saut d'indice** (200/380 μm) constituée d'un cœur et d'une gaine optique en verre de différents indices de réfraction. Cette fibre provoque, de par l'importante section du cœur, une grande dispersion des signaux la traversant, ce qui génère une déformation du signal reçu.
Apparue la première sur le marché, elle nécessite les matériels (émetteur et capteur) les moins coûteux. Elle est normalisée et utilisée pour les réseaux locaux Ethernet et Token Ring.
- La **fibre à gradient d'indice** (62.5/125 μm) dont le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. On s'approche ainsi d'une égalisation des temps de propagation des rayons lumineux.
Elle est employée pour de faible distance (2 km maximum)
- La **fibre monomode** dont le cœur est si fin que le chemin de propagation des différents rayons est pratiquement direct.
Le petit diamètre du cœur (10 μm) nécessite une grande puissance d'émission, donc des diodes au laser qui sont relativement onéreuses. Cette fibre est réservée à des applications à hauts débits et longues distances.



2.1.1.3. Ondes radio et infrarouge

- La grande majorité des réseaux locaux sans fil utilisent comme support de transmission les ondes radio, qui ont pour principal avantage de traverser différents types d'obstacles, notamment les murs. Mais lorsqu'une onde radio rencontre un obstacle, une partie de son énergie est absorbée et transformée en énergie, une partie continue à se propager de façon **atténuée** et une partie peut éventuellement être **réfléchie**. La valeur de l'atténuation dépend fortement du matériau composant l'obstacle. De plus, l'allocation des bandes de fréquences utilisées et la puissance du signal émis, sont soumis à une réglementation stricte propre à chaque pays.
- L'infrarouge peut être utilisé à la place des ondes radio lorsque l'endroit où le réseau doit être déployé est soumis à de fortes interférences. Il ne peut toutefois traverser les objets opaques comme les murs. L'utilisation de l'infrarouge en revanche, n'est pas soumise à une réglementation aussi stricte que les ondes radio.



Actuellement, il n'existe que peu de produits utilisant l'infrarouge comme support de transmission.

2.1.2. Ethernet / IEEE 802.3

Ethernet est une technologie de réseau local très répandue. Les produits implémentant cette technologie sont aujourd'hui très abordables et presque universels.

Les premières spécifications d'Ethernet, proposées par Digital Equipment Corporation, Intel et Xerox (DIX) ont été publiées en 1980, et appelées DIX 1.0.

DIX 1.0 a été suivi par DIX 2.0, publié en novembre 1982. Le standard DIX 2.0 est aussi appelé Ethernet V2.

Le comité 802.3 de l'IEEE, à partir de ces spécifications, a produit un premier standard en 1985, suivi de suppléments complétant ce document spécifiant d'autres médias, topologies et débits, ou précisant certaines fonctionnalités. L'ISO a finalement normalisé Ethernet en 1989 sous le numéro 8802-3, sans beaucoup de modification

Dans la norme IEEE un nom est attribué à chaque type de média, ou plus exactement à chaque mode de fonctionnement sur un média. Ce nom est de la forme :

XX TTT MM

Avec :

XX = débit de transmission en Mbit/s

TTT = technique de codage des signaux (bande de base ou large bande)

MM = identification du média ou longueur maximale d'un segment, en centaine de mètres

2.1.2.1. Ethernet 10 Mbit/s

2.1.2.1.1. Gros coaxial : 10BASE5

C'est le premier média normalisé en 1983. Les termes couramment utilisés pour désigner ce câble sont « gros coaxial », « câble thick » ou « coaxial jaune ».

Les paramètres fondamentaux sont :

- 500 m par brin, maximum
- 100 accès par brin, maximum
- 2,5 m minimum entre stations
- 25 cm de rayon de courbure minimal

Le câble épais, de par sa faible flexibilité, impose l'emploi de *transceivers* externes auxquels les stations sont reliées par un câble AUI.

2.1.2.1.2. Petit coaxial : 10BASE2

Le câble coaxial fin (et plus abordable) appelé *Thin Cable* ou *Thinnet*. Les distances et les capacités sont plus réduites :

- 185 m par brin, maximum
- 30 accès par brin, maximum
- 50 cm minimum entre station
- 5 cm de rayon de courbure minimal

Dans la majorité des cas, les transceivers employant une connectique beaucoup moins encombrante et moins chère (BNC), sont intégrés aux cartes coupleurs et connectés par de simples T.

2.1.2.1.3. Paires torsadées : 10BASE-T

Le premier supplément spécifiant le fonctionnement d'Ethernet à 10 Mbit/s sur la paire torsadée a été 10BASE-T (T = *twisted*)

Les principales caractéristiques sont :

- câble multipaire, non blindé par paire. Une liaison nécessite deux paires (UTP 3/4/5)
- l'émission et la réception se font sur deux paires distinctes
- connecteurs RJ45
- longueur maximum de 100 m

La caractéristique la plus importante de la norme 10BASE-T est la **topologie physique étoile**. Le principe de fonctionnement demeure basé sur une topologie de bus. C'est le concentrateur

ou *hub* qui est chargé de restituer à partir d'une topologie physique en étoile, un fonctionnement logique en bus.

2.1.2.1.4. Fibre optique : 10BASE-F

F comme *Fiber Optic* (fibre optique). La fibre optique monomode ou multimode est utilisée plutôt pour la mise en œuvre des *backbones* que pour relier entre elles les stations de travail. La fibre optique est coûteuse et plus difficile à installer ; elle autorise des distances maximales allant de 500 m à 2 km selon le type utilisé.

2.1.2.2. Ethernet 100 Mbit/s (FastEthernet)

Le standard 100BASE-T se divise en deux grandes catégories :

- 100BASE-T4, élaboré spécifiquement pour le support de l'UTP 3 et 4
- 100BASE-X, qui reprend des spécifications en provenance des réseaux FDDI

100BASE-T4 :

- 4 paires torsadées non blindées (UTP) catégorie 3, 4, ou 5,
- 3 paires à 33 Mbps et 1 paire pour la détection d'erreur,

La technologie 100BASE-X connaît deux implémentations :

- **100BASE-TX** : 2 paires torsadées blindées ou non (STP ou UTP)
 - catégorie 5 uniquement,
 - 1 paire émission et 1 paire réception/détection de collisions
 - le plus utilisé mais limité à 100 mètres,
 - le meilleur rapport qualité/prix du moment pour des LAN,
- **100BASE-FX** : 2 brins de fibre multimode 62,5/125 microns
 - seule solution pour dépasser les 100 mètres,
 - pas de normalisation en monomode.

2.1.2.3. GigaEthernet

1000BASE-X dit plus communément GigaEthernet (GE) est traité par le sous-comité IEEE 802.3z..

La technologie 1000BASE-X se décompose en trois technologies :

- 1000BASE-CX : sur paire torsadée blindée (C signifiant *Copper*, cuivre)
- 1000BASE-SX : sur fibre optique ; S = *Short Wave Length* (en l'occurrence 850 nm), connectique SC
- 1000BASE-LX : sur fibre optique ; L = *Long Wave Length* (à savoir 1 300 nm), connectique SC

1000BASE-T : traité dans le supplément 802.3ab, spécifie le fonctionnement de GigaEthernet sur 4 paires UTP 5 (donc 250 Mbit/s par paire) sur des liens de 100 m au plus, et pouvant travailler en *full-duplex*. Connecteur RJ45.

2.1.2.4. 10GigaEthernet

Les solutions à 10 Gbit/s sont commercialisées depuis 2002. Ces solutions ne fonctionnent qu'en mode commutation totale sur des distances de 2 m à 40 km, et uniquement sur fibre optique.

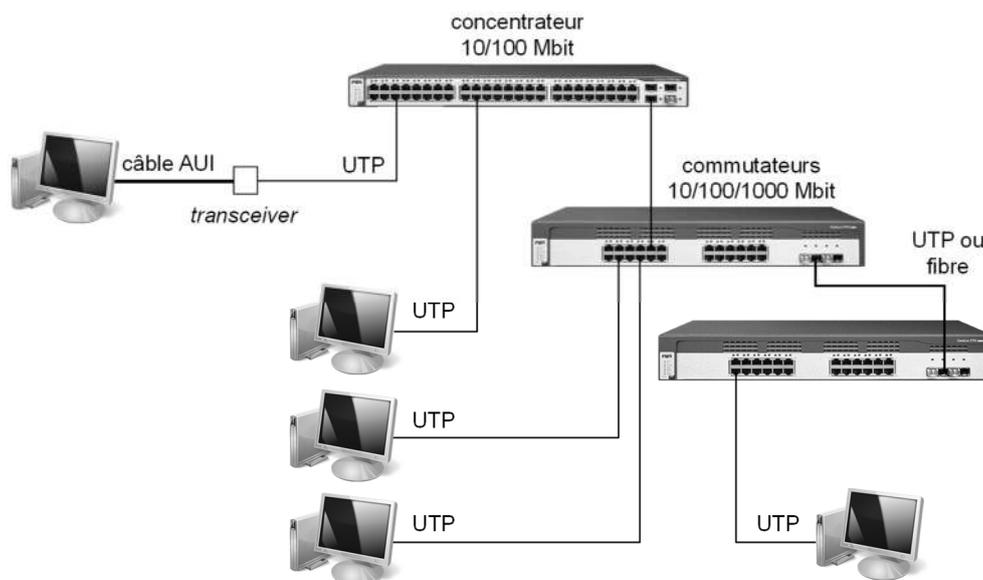
La norme **10GBaseT** a été ratifiée en juillet 2006. Seuls des câbles de catégorie 6a ou 7 permettent d'atteindre les 100 m, et pour les câbles de Cat7 avec la connectique GG45 de Nexan (rétro-compatibles avec la connectique RJ45).

2.1.2.5. 25GigaEthernet et 40GigaEthernet

Le **25GBase-T** et **40GBase-T**, standard 802.3bq, ont été adoptés en 2016. Ils utilisent un câblage à 4 paires torsadées équilibrées avec 2 connecteurs sur des distances de 30 m (utilisation en datacenter). Le réseau en cuivre 40 Gb est souvent refusé par de nombreuses entreprises en raison de son coût plus élevé et de sa faible évolutivité par rapport à un réseau en cuivre 10 Gb.

2.1.2.6. Topologie Ethernet

Ethernet 10/100/1000 en paires torsadées :



2.1.3. IEEE 802.11 et Wi-Fi

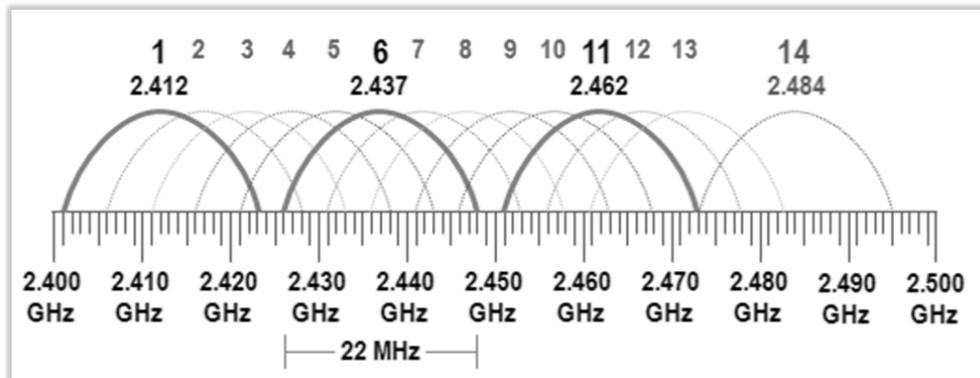
Il existe actuellement deux standards de réseaux locaux sans fil issus de deux organismes différents de standardisation

2.1.3.1. HiperLAN (High Performance Radio LAN)

HiperLAN est issu d'un comité de l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) et utilise la bande de fréquences des 5 GHz. La version 1 autorise des débits allant jusqu'à 24 Mbit/s contre 54 Mbit/s pour la version 2.

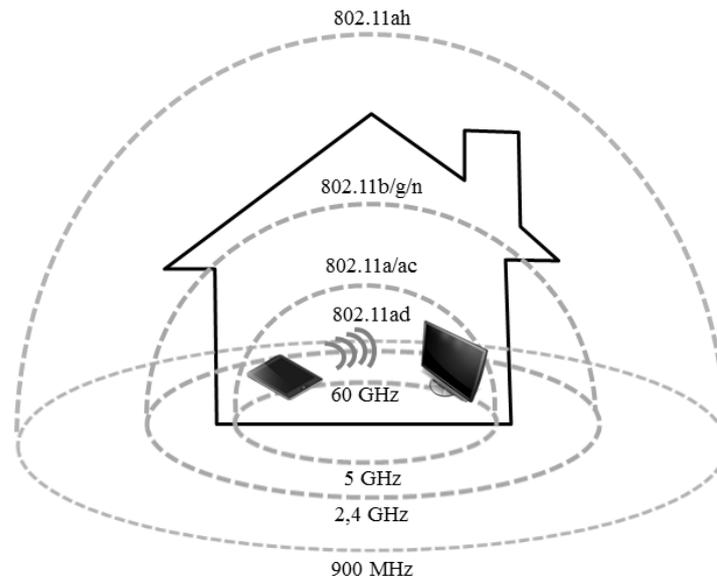
2.1.3.2. 802.11

802.11 est issu des travaux de l'IEEE et utilise principalement la bande de fréquences des 2,4 GHz ou bande ISM (*Industrial Scientific and Medical*). Cette bande est découpée en 14 canaux de transmission (13 canaux sont autorisés en France) ; les canaux se chevauchant, il n'est pas possible de faire cohabiter plus de 3 réseaux sans fil dans le même environnement radio.



Des améliorations et extensions ont été apportées à la norme de base 802.11 :

- **IEEE 802.11b**, plus connue sous le label Wi-Fi, offrant un débit maximal de 11 Mbit/s (comparable à un Ethernet 10BaseT)
- **IEEE 802.11g**, avec un débit maximal de 54 Mbit/s.
- **IEEE 802.11n** offrant un débit de 100 Mbit/s sur 90 m en utilisant la technologie MIMO (émission et réception simultanée sur plusieurs antennes) dans les bandes de fréquences 2,4 et 5 GHz. La norme a été ratifiée le 11/09/2009 pourtant des produits certifiés 802.11n draft 2.0 (« brouillon de la norme ») étaient déjà commercialisés.
- **IEEE 802.11ac**, normalisé le 08/01/2014 et utilisant exclusivement une bande de fréquence comprise entre 5 et 6 GHz, avec des variations selon les pays. Elle offre un débit théorique de 1,3 Gb/s et jusqu'à 7 Gb/s de débit global grâce notamment à l'agrégation de davantage de canaux disponibles (dans la base des 5 GHz) et la technologie MIMO. La compatibilité ascendante est assurée avec la variante 802.11n utilisant la bande de fréquence des 5 GHz.
- **IEEE 802.11ad** et **802.11ah** ont été approuvés respectivement en 2012 et en 2017. Bien qu'encore très peu utilisés (pour les particuliers), elles restent des technologies prometteuses utilisant de nouvelles fréquences. 802.11ad offre un débit max de 6,75 Gbit/s dans la bande de fréquences de 60 GHz mais avec une portée limitée à 10m seulement. Elle devrait permettre de remplacer les liaisons par câble entre équipements. 802.11ah offre un débit de seulement 8 Mbit/s mais une portée maximale du signal de 100m dans la bande de fréquences de 0,9 GHz.

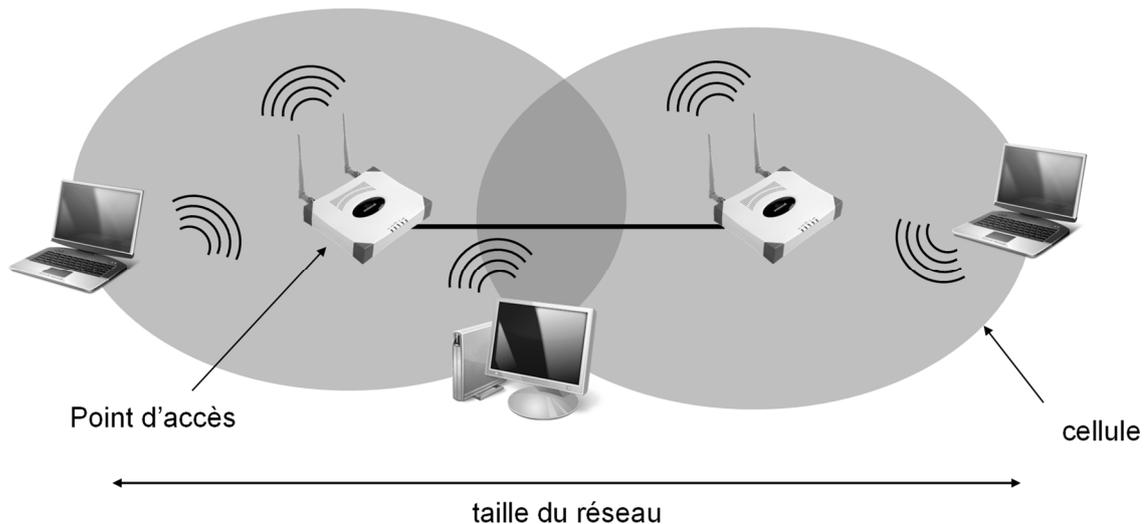


- **IEEE 802.11ax** est le futur standard qui devrait être ratifié par l'IEEE en septembre 2020. Ce futur standard a été rebaptisé Wi-Fi6 par le consortium Wi-Fi Alliance dans le cadre d'une simplification de la nomenclature. Il offrira un débit de 1,2 Gb/s par flux (contre 866 Mb/s pour le 802.11ac ou Wi-Fi 5), une consommation réduite pour les appareils mobiles et une meilleure gestion d'un grand nombre d'appareils connectés (aéroports, gare, centres commerciaux, stades, etc.) ; il est prévu pour fonctionner même en cas de fortes interférences du signal, et sera rétrocompatible avec le Wi-Fi 802.11 a/b/g/n/ac (Wi-Fi 1, 2, 3, 4 et 5) en utilisant les bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz.

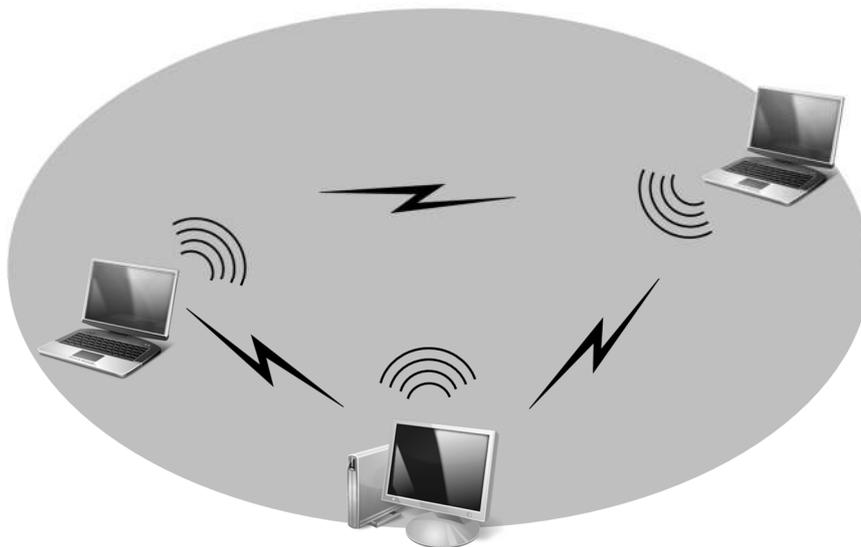


Les réseaux IEEE 802.11 fonctionnent selon deux modes possibles :

- Le **mode infrastructure** désigne un réseau basé sur un ou plusieurs **points d'accès** ou AP (*Access point*). Les stations s'associent au(x) point(s) d'accès pour s'échanger des données. A un point d'accès peuvent être associées jusqu'à 100 stations. Les points d'accès sont reliés entre eux. La taille du réseau dépend de la zone de couverture du point d'accès aussi appelé **cellule**. Les cellules peuvent se recouvrir ou être disjointes
Le support de transmission et le débit (théorique) de 11 Mbit/s (ou de 54 Mbit/s) sont partagés entre toutes les stations. En pratique le débit se dégrade automatiquement selon la distance et l'environnement (type de construction, interférences ...).



- Dans le **mode ad-hoc**, il n'existe pas de point d'accès et ce sont les stations elles-mêmes qui entrent en communication. L'avantage de cette topologie est sa simplicité de mise en œuvre, puisqu'il suffit uniquement de stations équipées de cartes Wi-Fi.



2.1.4. Equipements spécifiques du réseau local (filaire)

2.1.4.1. Répéteur

C'est un appareil qui régénère les signaux qui s'affaiblissent lorsque l'on atteint la longueur maximum admise pour les câbles utilisés. Il doit être employé :

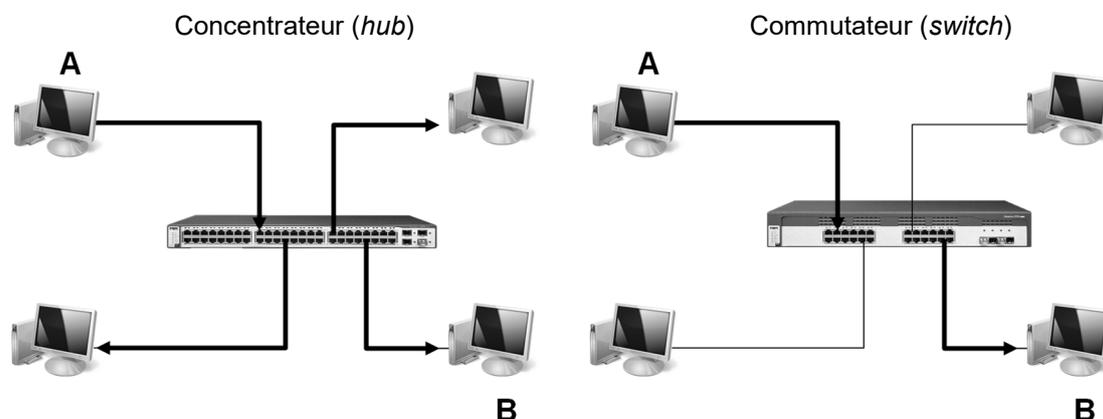
- tous les 100 m pour de la paire torsadée,
- tous les 185 m pour du coaxial fin,
- tous les 500 m pour du gros coaxial

Il peut se présenter sous différentes formes et appellations :

- répéteur bi-port interconnectant 2 segments
- **concentrateur** ou **hub** au centre d'une topologie étoilée
- **étoile optique** (active ou passive) lorsque le média est de la fibre optique

2.1.4.3. Commutateur ou *switch*

Il se présente comme un pont multi-ports performant. Il agit comme un répéteur filtrant qui distribue les trames uniquement sur la (les) voie(s) concernée(s). Le commutateur a l'aspect d'un hub, chaque carte réseau est reliée directement à un port du commutateur (commutation par port). Il est également possible de mettre un réseau Ethernet sur chaque port (commutation par segment).



L'utilisation de commutateurs permet d'améliorer la confidentialité (le trafic d'un port n'est pas visible sur les autres ports, contrairement avec un hub), et surtout d'augmenter la bande passante du réseau (la capacité totale du réseau est multipliée par le nombre de ports). Certains switches permettent d'entrer dans une table les adresses des stations associées à un port et donc d'interdire l'utilisation du commutateur à certaines stations.

VLAN

La notion de **VLAN** ou **réseaux locaux virtuels** (*Virtual LAN*) introduit une segmentation des grands réseaux d'entreprise. Le regroupement en VLAN est apparu comme une nouvelle fonctionnalité avec le développement des commutateurs.

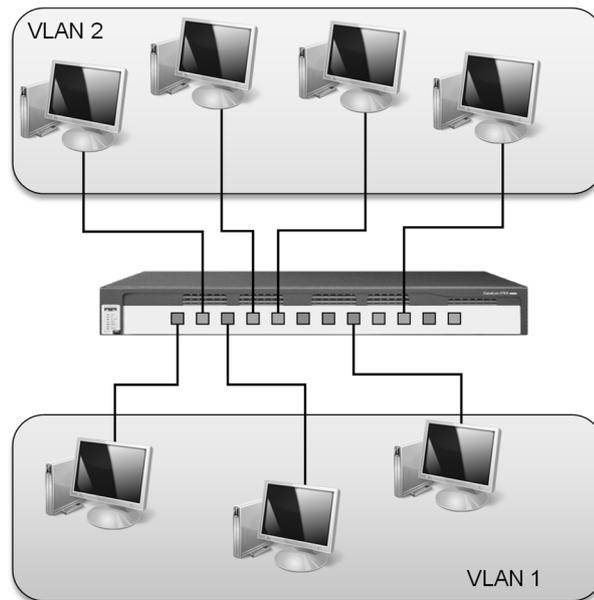
Un VLAN peut être défini comme un domaine de *broadcast*, c'est-à-dire un domaine où l'adresse de diffusion atteint toutes les stations appartenant au VLAN.

Les stations sont regroupées par VLAN de façon logicielle sur les commutateurs, suivant des critères qui sont propres à l'entreprise.

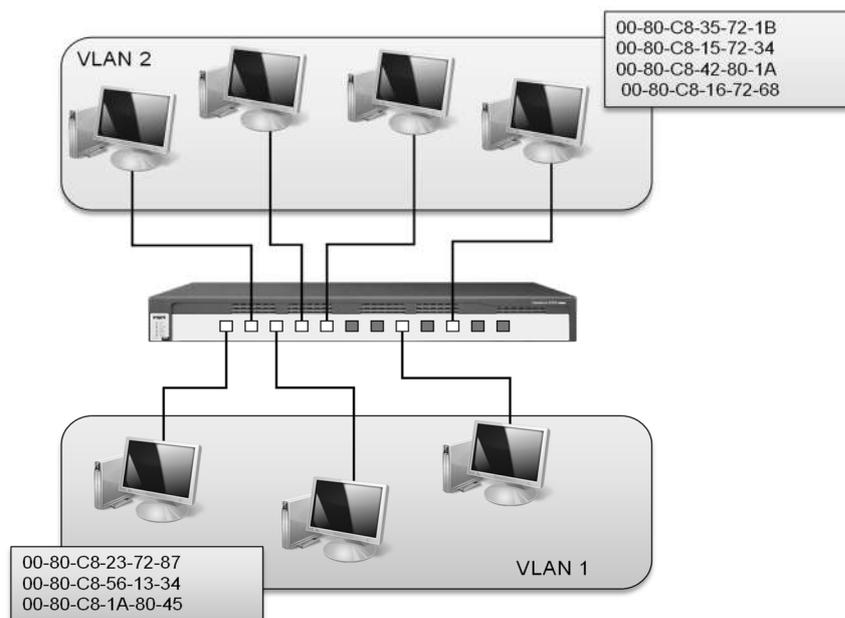
Les communications à l'intérieur d'un VLAN peuvent être sécurisées, et les communications entre deux VLAN distincts contrôlées.

Plusieurs types de VLAN ont été définis, suivant les regroupements des stations :

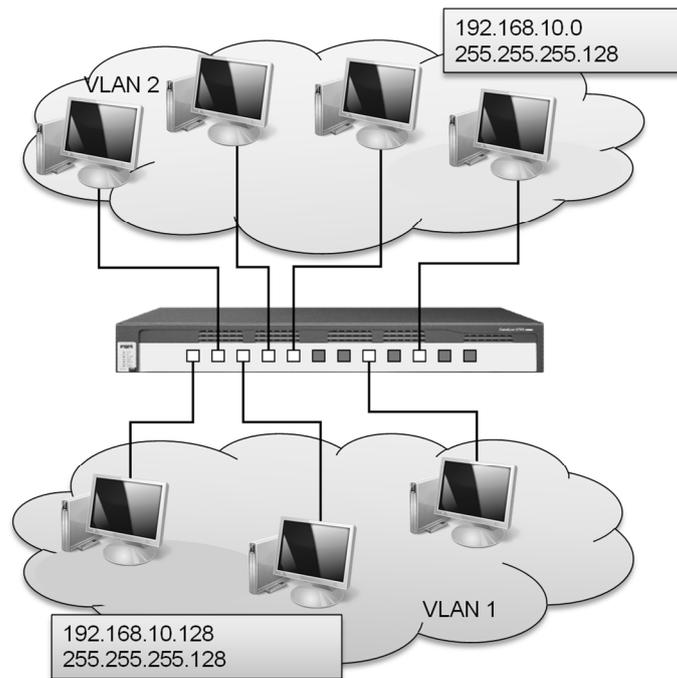
- Les VLAN de niveau physique, ou de **niveau 1**, regroupent les stations appartenant aux mêmes réseaux physiques. Le regroupement se fait au niveau des **ports** des commutateurs et est relativement facile à mettre en œuvre, mais on ne peut définir qu'un seul VLAN par port.



- Les VLAN de niveau MAC, ou de **niveau 2**, regroupent les stations en fonction de leur **adresse MAC**. Une station peut appartenir à plusieurs VLAN simultanément. L'inconvénient tient à la difficulté de manipulation des adresses MAC.



- Les VLAN de niveau paquet, ou de **niveau 3**, correspondent à des regroupements de stations suivant leur adresse de niveau 3 (adresses IP par exemple). Ce type de configuration est aisé à mettre en place car les stations peuvent être facilement regroupées par **sous-réseau** ou **plages d'adresses**.



3. Format d'adresses et de trames

3.1. Adressage MAC

L'adressage au niveau MAC permet d'identifier chaque carte interface connectée au réseau. En effet, la méthode d'accès nécessite généralement un adressage unique pour chaque coupleur, souvent appelée **adresse MAC**, ou plus improprement adresse physique. Ces adresses sont utilisées dans l'en-tête de la trame pour préciser le destinataire de l'information mais aussi son émetteur.

L'adresse MAC est le plus souvent implémentée de façon statique (inscrite en ROM sur la carte par exemple, alors appelée BIA : *Burst In Address*).

Le comité IEEE 802 a défini un adressage uniforme pour toutes les technologies qu'il a standardisées (CSMA/CD, Token-Bus, Token-Ring, DQDB). L'ANSI (*American National Standard Institute*) a réutilisé cet adressage pour FDDI, que l'on retrouve aussi en ATM.

La longueur des adresses MAC est de 6 octets, découpée en deux parties :

- les 3 premiers octets précisent le numéro du constructeur de l'interface coupleur
- les 3 derniers précisent le numéro de série du coupleur chez ce constructeur



I/G : <i>Individual/Group</i> =	0	adresse individuelle
	1	adresse de groupe
U/L : <i>Universal/Local</i> =	0	adresse administrée globalement
	1	adresse administrée localement

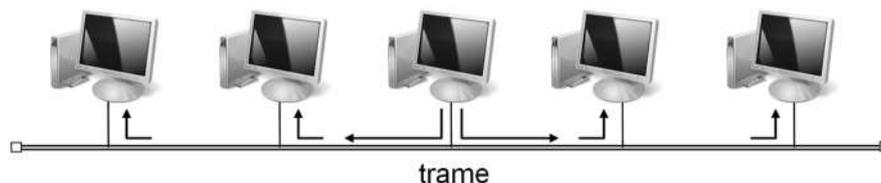
- Si le premier bit de l'adresse destination est positionné à 1, la trame est de type **multicast** et concerne un groupe de destinataires, et non plus une seule station (**unicast**).
- Si tous les bits de l'adresse destination sont à 1 (0xFF-FF-FF-FF-FF-FF), la trame est une **broadcast** (diffusion générale) et concerne toutes les machines raccordées.

La partie constructeur codée sur 24 bits, aussi dénommée OUI (*Organizationally Unique Identifier*) est attribuée par l'IEEE.

3.2. Ethernet

3.2.1. Principe de fonctionnement

Un principe fondamental du réseau Ethernet est la **diffusion à tout le monde** de toute la trame. La **propagation** de la trame est **bidirectionnelle** : une trame qui est envoyée par une station située au milieu du câble se propagera des deux côtés.



En Ethernet, le média (en *bus*) est partagé entre tous les coupleurs raccordés. La méthode d'accès repose sur le CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* ou détection de porteuse et accès multiples avec détection de collisions).

Lorsqu'une station veut émettre, elle vérifie par détection de porteuse (*Carrier Sense*) que le média est libre, c'est-à-dire qu'aucune trame n'est en train de circuler, puis elle émet sa trame qui se propage dans tout le réseau : toutes les stations la reçoivent mais seul le destinataire la traite. En cas d'occupation la station attend (éventuellement indéfiniment) que le média se libère. Si la station a plusieurs trames à émettre, elle procède de la même manière pour chacune :

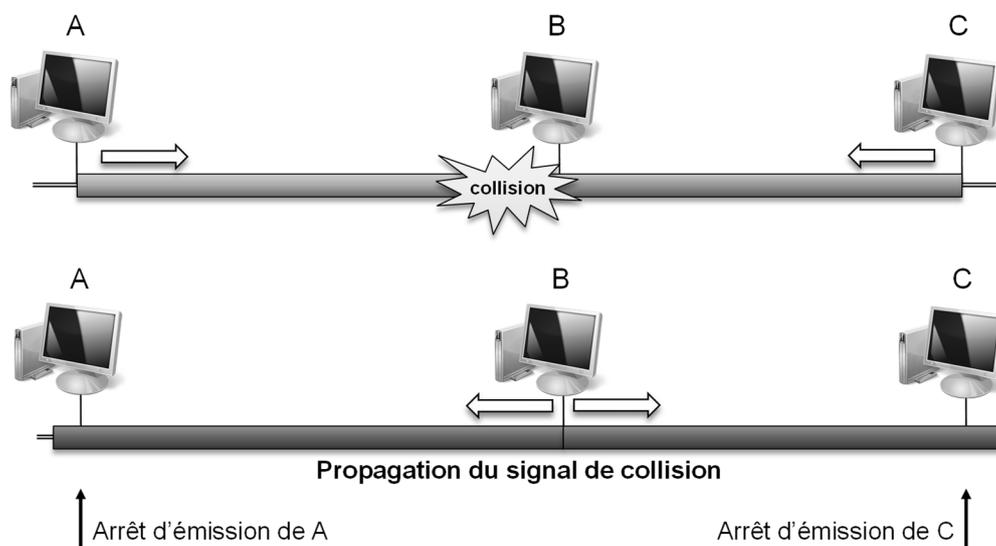
- écoute du média
- attente éventuelle jusqu'à ce que le média soit libre,
- émission

Un délai minimum entre trames est imposé : 96 bits-times à 10 Mbit/s, soit 9,6 μ s. Pour un débit de 100 Mbit/s, 1 bit-time = 0,01 μ s, et le délai inter-trames est de 0,96 μ s.

Comme la vitesse de propagation du signal sur le média n'est pas infinie, il est possible que deux coupleurs émettent en même temps. Leurs émissions vont alors se superposer (on dit « entrer en collision ») et seront considérées comme perdues.

La **collision** est un phénomène parfaitement normal et inhérent au principe du protocole Ethernet. Seul un taux de collision trop élevé peut être anormal et traduire un dysfonctionnement. Le taux de collision est fonction du trafic et du nombre de stations souhaitant émettre en même temps.

C'est le **transceiver** qui est chargé de la **détection des collisions**. Lorsqu'il en a détecté une, il en informe la station qui est connectée sur lui. Dès que les stations qui ont créé la collision reçoivent de leur transceiver, le signal de détection de collision, elles s'arrêtent d'émettre et envoient des bits de renforcement de collision (*jam*) afin que tous les transceivers du réseau détectent la collision.

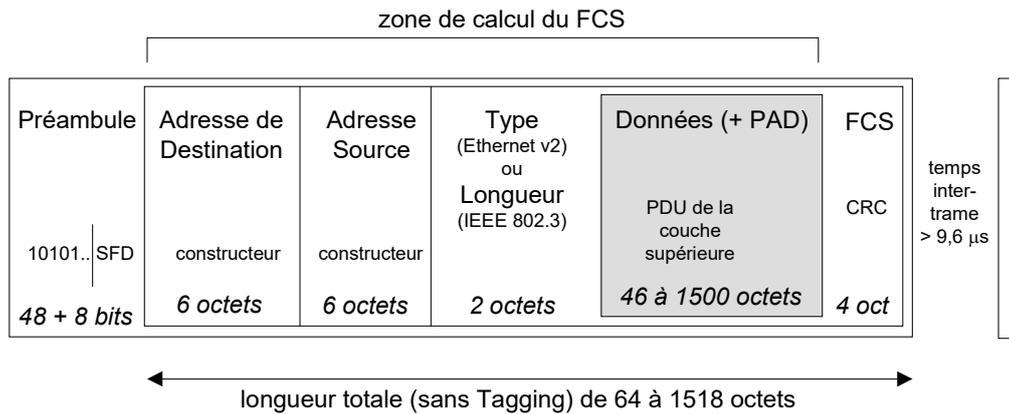


Pour améliorer le CSMA, l'algorithme de récupération sur une collision, dit de *back-off* correspond à une procédure qui permet d'incorporer une variable aléatoire (de manière à éviter que les deux coupleurs ne se synchronisent sur leur première collision) et à étaler les tentatives de retransmission dans le temps.

Une même trame est, en cas de collisions successives, **ré-émise 16 fois**, après quoi elle est considérée comme perdue : *excessive collision*. Le temps d'attente aléatoire après une collision est pris dans un intervalle de temps qui augmente au fur et à mesure des essais successifs de manière exponentielle (cas de collisions répétées). Le premier intervalle est de 512 bits-times (51,2 μ s à 10 Mb/s et 5,12 μ s à 100 Mb/s). A partir de la 10^e, l'intervalle est porté à 5 ms.

3.2.2. Format des trames

Les trames sont élaborées par la couche 2 et constituées de différentes zones, les champs. La longueur totale d'une trame (préambule non compris) va de 64 à 1518 octets.



- Le **préambule** est une séquence de 48 bits à 1 et à 0 successivement servant à la synchronisation des récepteurs sur l'émetteur (Ethernet étant une technologie asynchrone au niveau trame). Ces 48 bits sont suivis de la série 10101011, appelée *Starting Frame Delimiter* (SFD), et dont les 2 derniers bits à 1 déclenchent la lecture de la trame proprement dite.
- Les adresses MAC Ethernet respectent le format IEEE 802 décrit précédemment (adresses uniques codées sur 6 octets).
- Le champ suivant peut avoir deux significations, **type** ou **longueur**, selon le standard auquel la trame se conforme.
 - A l'origine, il indiquait le type du protocole de niveau supérieur (il est d'ailleurs encore nommé *Ether Type*). Un certain nombre de numéros avaient ainsi été attribués et permettaient d'aiguiller immédiatement le contenu de la trame pour son décodage suivant et son interprétation (par exemple, si la trame Ethernet transporte des données TCP/IP, la valeur de ce champ est 0x800).
 - Dans le standard IEEE il désigne la longueur en octets du champ de données, PAD non compris.

Les valeurs vont donc de 0 à 1500 (soit 0x0 à 0x5DC), et c'est cette délimitation qui permet de savoir si la trame est de type Ethernet (valeur du champ $\geq 0x600$: numéro de protocole) ou de type IEEE 802.3 (valeur $\leq 0x5DC$: longueur).
- Les données ou champ **Info** correspondent au paquet de niveau supérieur que la carte Ethernet est chargée d'acheminer. Il peut s'agir d'un protocole Réseau tel que IP, ou bien de la couche LLC (IEEE 802.2). Quand moins de 46 octets doivent être transmis, le champ Info est complété par un PAD (bourrage).
- Le **FCS**, pour *Frame Check Sequence*, est un contrôle d'intégrité de la trame basé sur une vérification de redondance circulaire (CRC) de 4 octets, calculé à partir de la trame (de l'adresse MAC destination jusqu'au champ Info) et d'un polynôme entier de degré 32. Le FCS permet de détecter les erreurs de 1, 2 ou d'un nombre impair de bits (ainsi qu'une majorité des rafales d'erreurs).
Ce CRC est produit par la couche MAC ayant émis la trame (résidant dans l'interface coupleur) et est recalculé lors de la lecture par toute station Ethernet, ou bien lors du passage au travers de ponts ou de routeurs. Si le CRC calculé et le CRC reçu ne correspondent pas, la trame est jugée corrompue et est éliminée.