Introduction à la cyberstructure de l'internet - réseaux et sécurité

UE CNAM - **UTC505**

François Lacomme <francois.lacomme@2isa.net>

Documents liés aux cours et TP : https://utc505.seancetenante.com

2025/2026

1 - Plan du cours

- Diviser pour régner **(modèle OSI)**
  - Découverte de l'**architecture de communication en couches**. Du modèle OSI à l'architecture Internet; introduction aux protocoles http, DNS et à l'outil d'analyse de traces Wireshark.
- Les autoroutes de l'information : nids de poules et travaux en tous genres **(couche physique)**
  - Concepts et problèmes de la transmission de données : erreurs de transmission, le contrôle d'erreur, notion de bande passante, traitement des signaux, atténuation, modulation, multiplexage, commutation, synchronisation d'horloge, problèmes de caractère et de bit stuffing.
- Collectivisme ou Libre entreprise… à la recherche d'un modèle équitable **(sous-couche MAC)**
  - Grandes familles de protocoles à compétition et à coopération, détail sur CSMA/CD et CSMA/CA en mode infrastructure. Ponts et commutation.

1 - Plan du cours

- Croisements et Destination **(couche réseau)**
  - Adressage, tables de routage et l'expédition de données dans le réseau IP. Evolution de IPv4 à IPv6.
- Une lettre ou un appel ? **(couche transport)**
  - Transport de données entre un client et un serveur à travers UDP et TCP avec le modèle datagramme, et les approches connecté et non connecté. Gestion et utilisation de l'API socket.
- Où sont les clefs ? **(Introduction à la sécurité)**
  - Aspects sécurité de base pour la confidentialité, l'intégrité, l'authentification et la notarisation : principes de cryptographie symétrique et asymétrique, fonctions de hachage cryptographique.

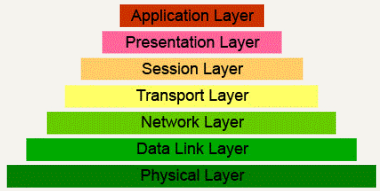
2 - Prologue

Taille de réseaux

Taille		Abréviation	Réseau
1m		PAN Personal Area Network	Réseau domestique
10 m	salle		
100 m	entreprise	LAN Local Area Network	Réseau local
1 km		MAN Metropolitan Area Network	Réseau métropolitain
10 km	ville		
100 km	région	WAN Wide Area Network	Réseau longue distance Réseau étendu
1000 km	pays, continent		
10 000 km	terre entière	GAN (Global Area Network) **Internet**	Réseau mondial ex. : Internet (Réseau de réseaux TCP/IP)

Fig 0.1 - Taille de réseaux

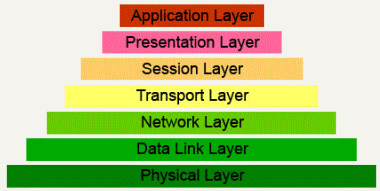
Architecture de communication en couches



1 - Architecture logicielle des réseaux

- **Forte structuration des logiciels de réseaux pour réduire la complexité de conception** des réseaux
  - Diviser pour mieux régner
  - Rendre chaque problème de communication autonome avec des interfaces claires
  - Une approche récursive et générique
- **Organisation en couches ou niveaux :**
  - Une couche N offre un ensemble de **services** à la couche immédiatement au-dessus N+1.
  - La couche N se sert pour cela de la couche N-1 en dessous, masquant à la couche N+1 le fonctionnement et la complexité de la couche N-1.
  - Chaque couche est construite au-dessus de la précédente et gère la communication avec **la couche de même niveau** d'une autre machine
  - Cette communication utilise des règles et des conventions appelées **protocoles**
  - Le **support de transmission** (la couche 0), lié à la couche la plus basse, véhicule réellement la communication

Architecture de communication en couches



1 - Architecture logicielle des réseaux

- **Illustration**
  - L'architecture philosophe/ traducteur/ secrétaire

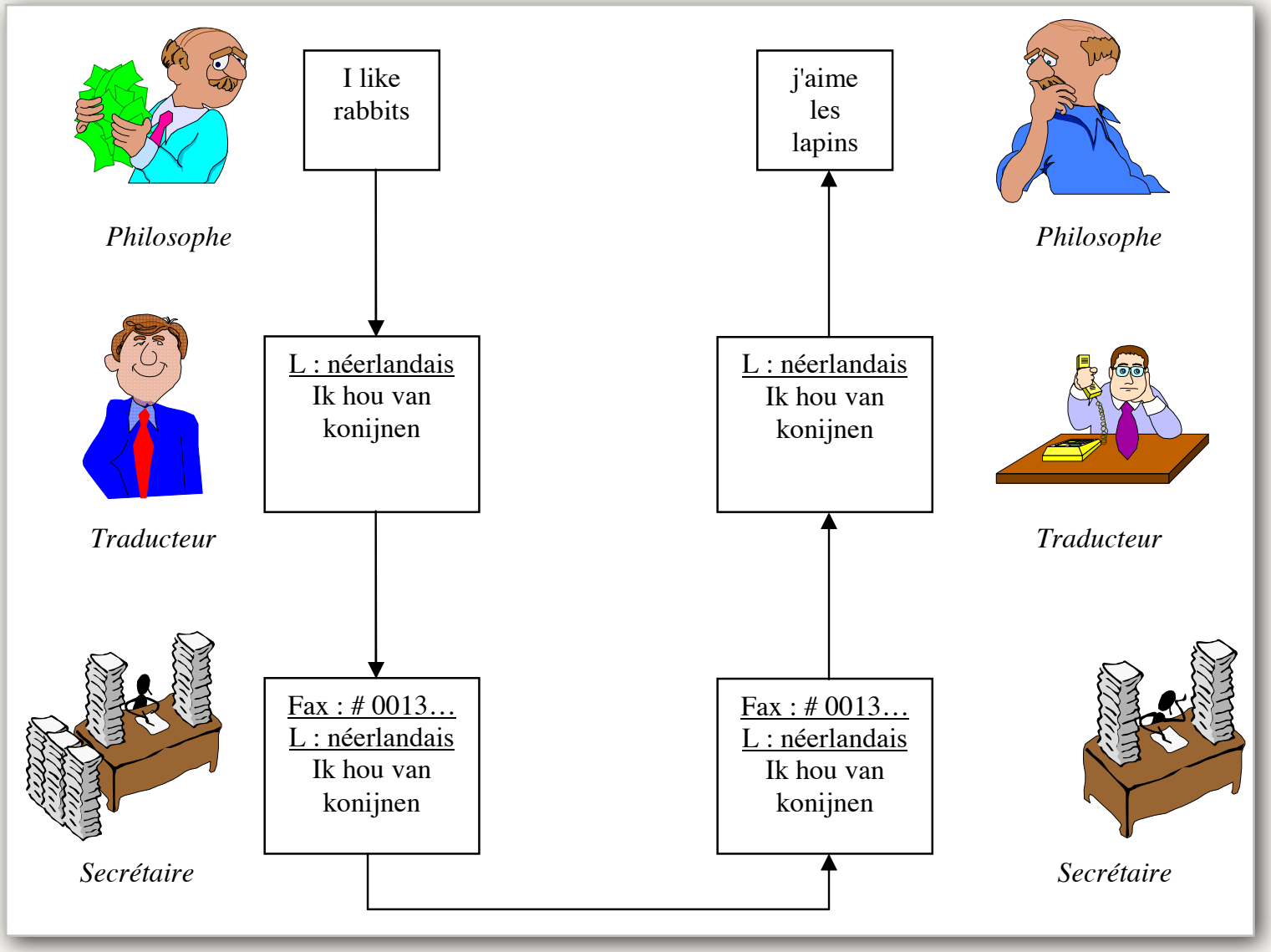
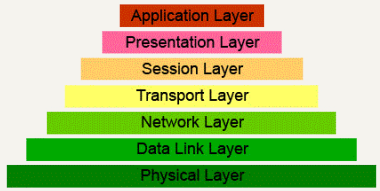


Fig 1.1 - Une architecture à trois couches

Architecture de communication en couches



2 - Définitions

- **Protocole P(n) d'une couche *n***
  - Ensemble des **règles et conventions** utilisées pour le dialogue de la couche **n**
- **Pile de protocoles**
  - Ensemble des protocoles utilisés par un système, avec 1 protocole par couche

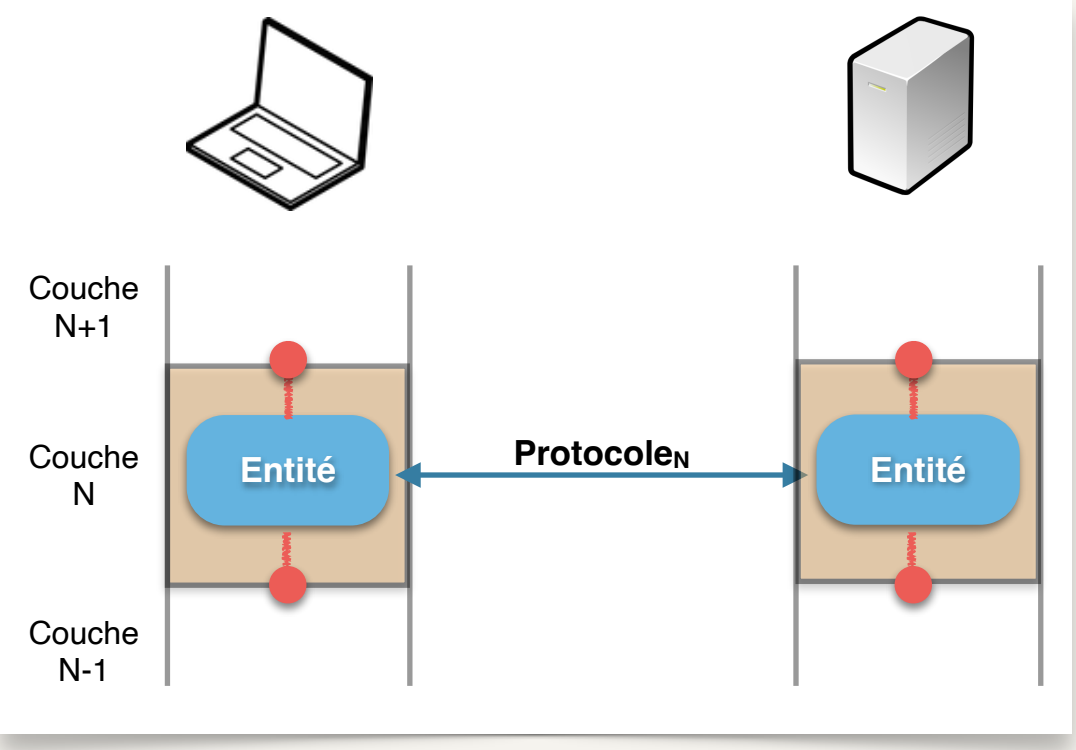
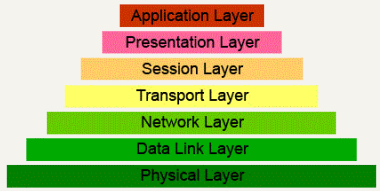


Fig 1.2 - Protocole$_N$ d'une couche N

- **Service**
  - Description abstraite de fonctionnalités à l'aide de **primitives de service** (commandes ou événements)
  - Le service d'une couche ***n*** définit l'ensemble des fonctionnalités possédées par la couche ***n*** et fournies aux entités de la couche ***n+1*** à l'interface ***n/n+1***

Architecture de communication en couches



2 - Définitions

- **Interface**
  - Accès à l'ensemble des opérations élémentaires et des services qu'une couche (n) offre à la couche (n+1) supérieure
  - Une interface est le moyen concret d'utiliser un **service**

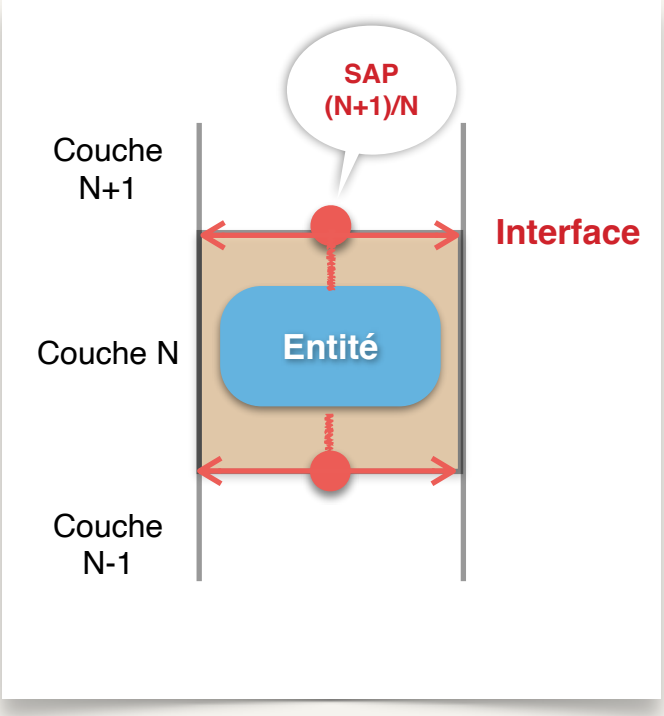
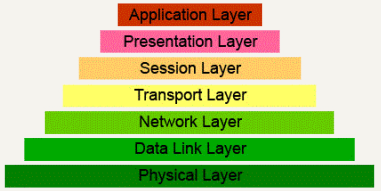


Fig 1.3 - Interfaces entre couches

- **Encapsulation**
  - Technique consistant à ajouter à un bloc de données un en-tête (*header*), et éventuellement une queue (*trailer*). L'en-tête contient les informations de contrôle du protocole.

- **Décapsulation**
  - Extraction des données utiles à partir de l'unité de données de protocole

Architecture de communication en couches



2 - Définitions

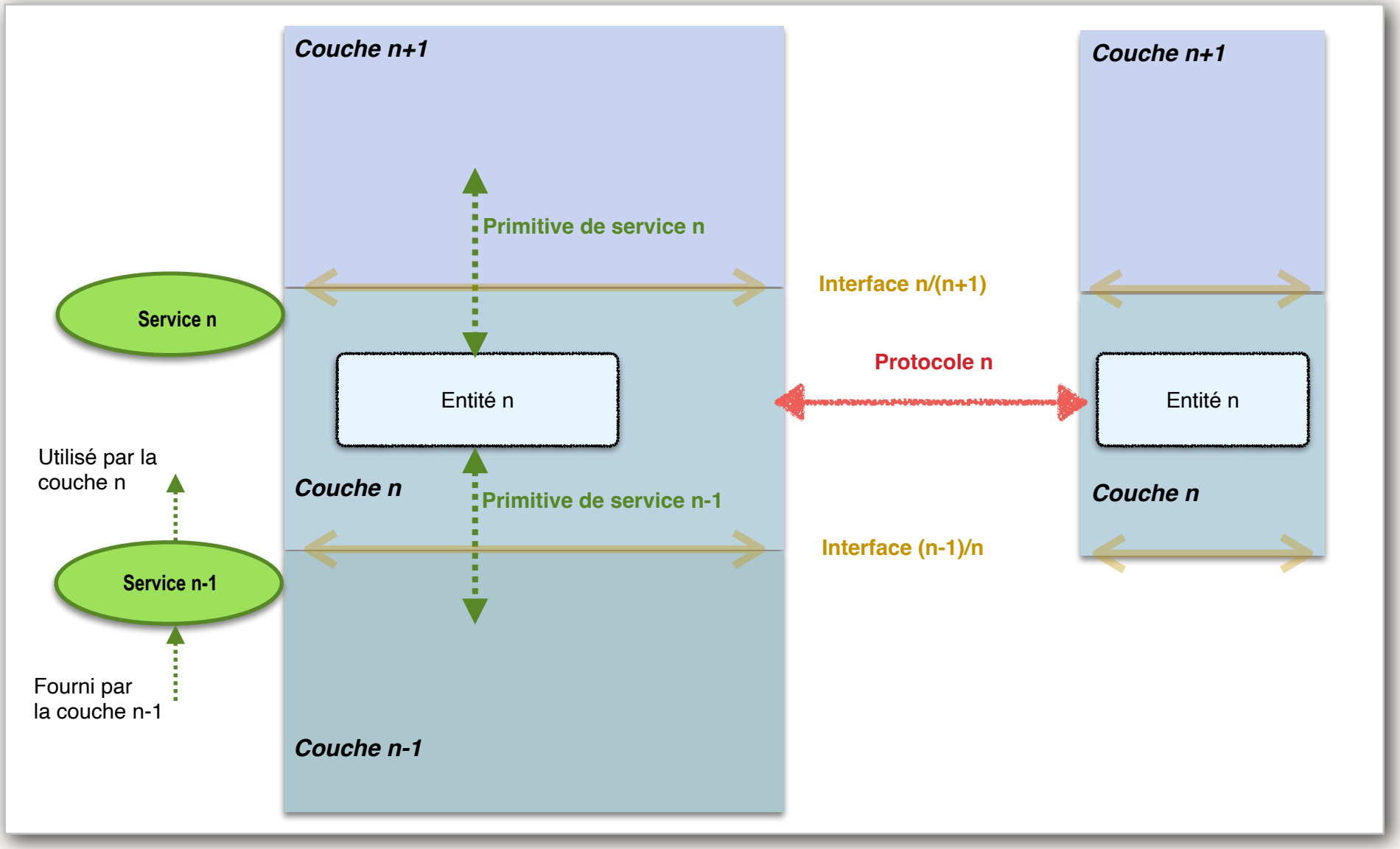


Fig 1.4 - Couches, services et protocoles

2 - Définitions

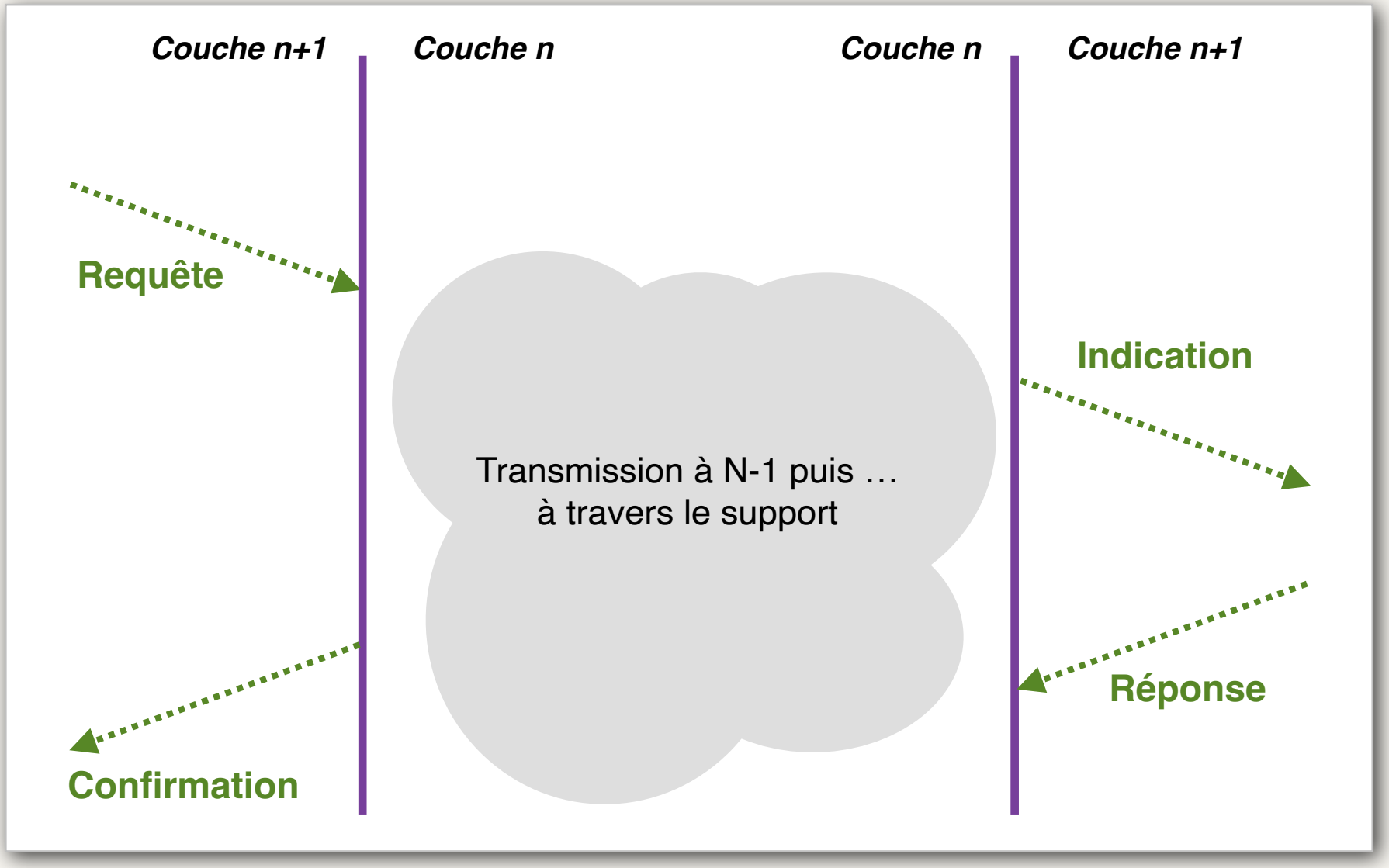
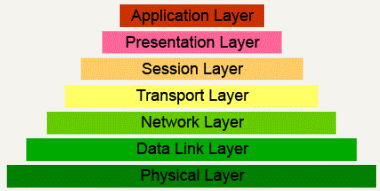


Fig 1.5 - Primitives de service



2 - Définitions

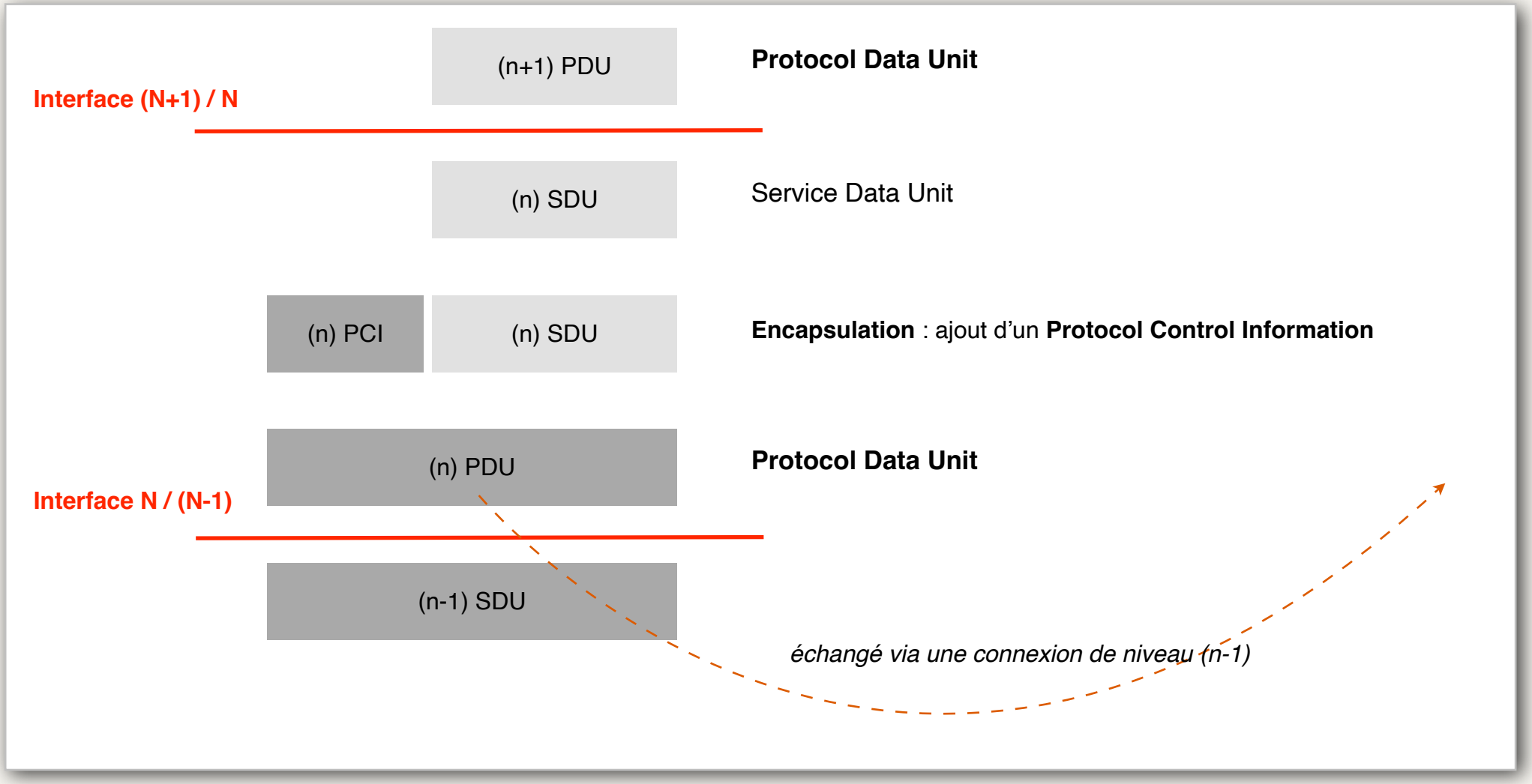


Fig 1.6 - Unités de Données de Protocole & encapsulation

2 - Définitions

- **Modèle OSI**
  - Modèle **OSI**, *Open Systems Interconnection* de l'ISO, *International Standard Organization*

  - Ce modèle de référence a été conçu par l'ISO (années 1970) et a été normalisé en 1984 et révisé en 1994.

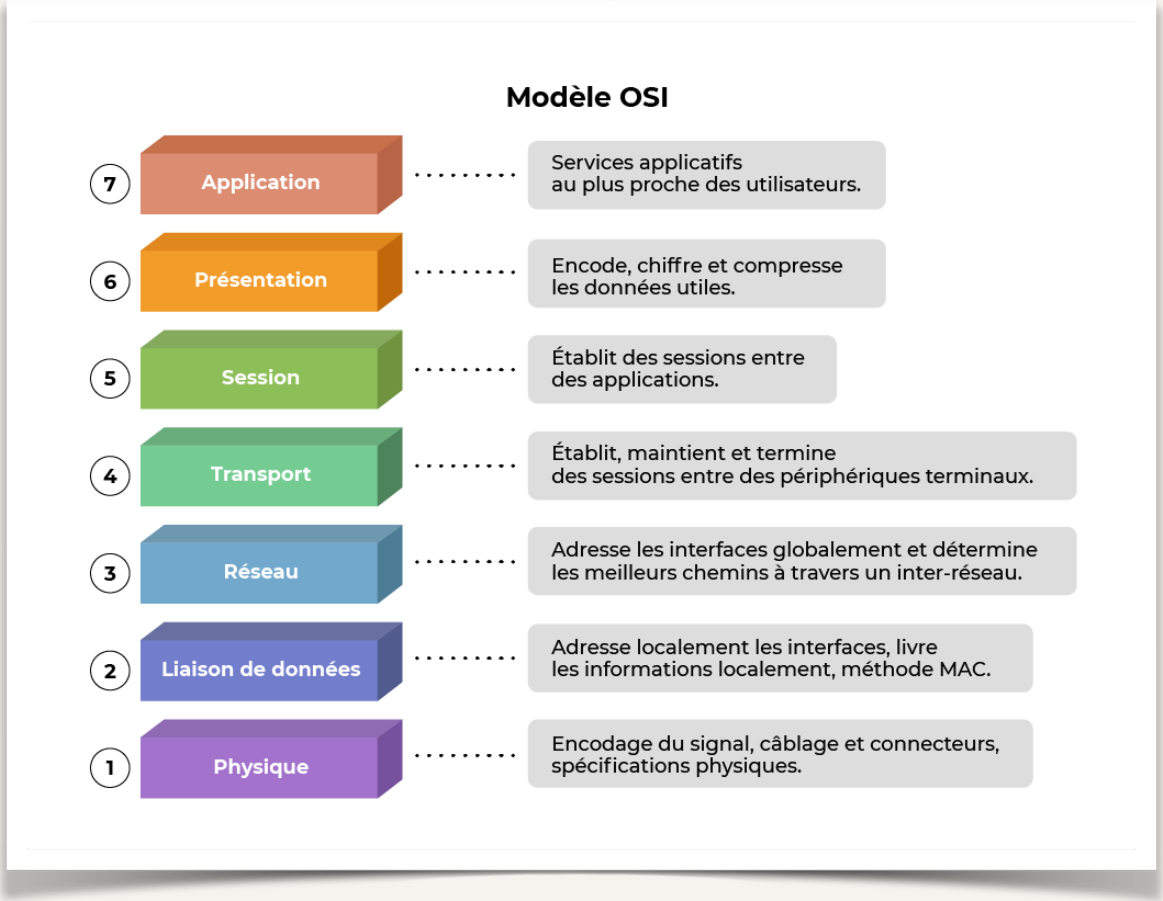
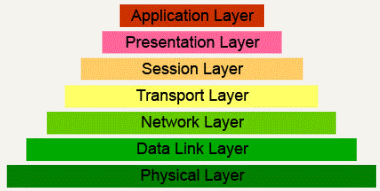


Fig 1.7 - Le modèle OSI

Architecture de communication en couches



3 - Le modèle de référence OSI

- ***P**our*
  ***L**e*
  ***R**éseau*
  ***T**out*
  ***S**e*
  ***P**asse*
  ***A**utomatiquement*

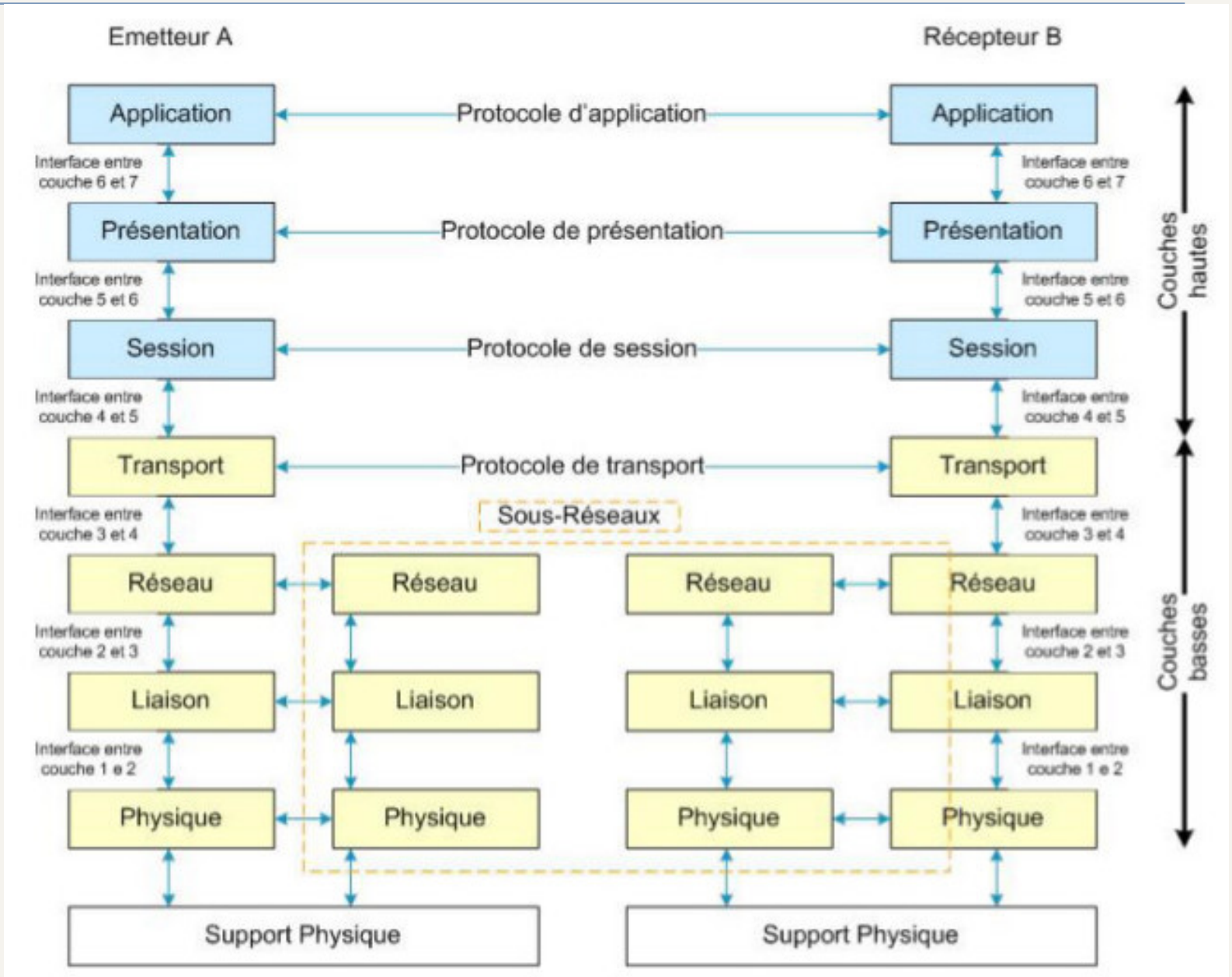


Fig 1.5 - Schéma du modèle en couche OSI

3 - Le modèle de référence OSI

- Le modèle OSI (*Open Systems Interconnection*) est un cadre conceptuel développé par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) pour standardiser la communication entre systèmes informatiques en réseau.

- Créé dans les années 1970 et publié en 1984, ce modèle divise le processus de communication en **sept couches distinctes**, chacune ayant des fonctions spécifiques et interagissant avec les couches adjacentes.

- Cette division facilite la compréhension, la conception et le dépannage des réseaux complexes.

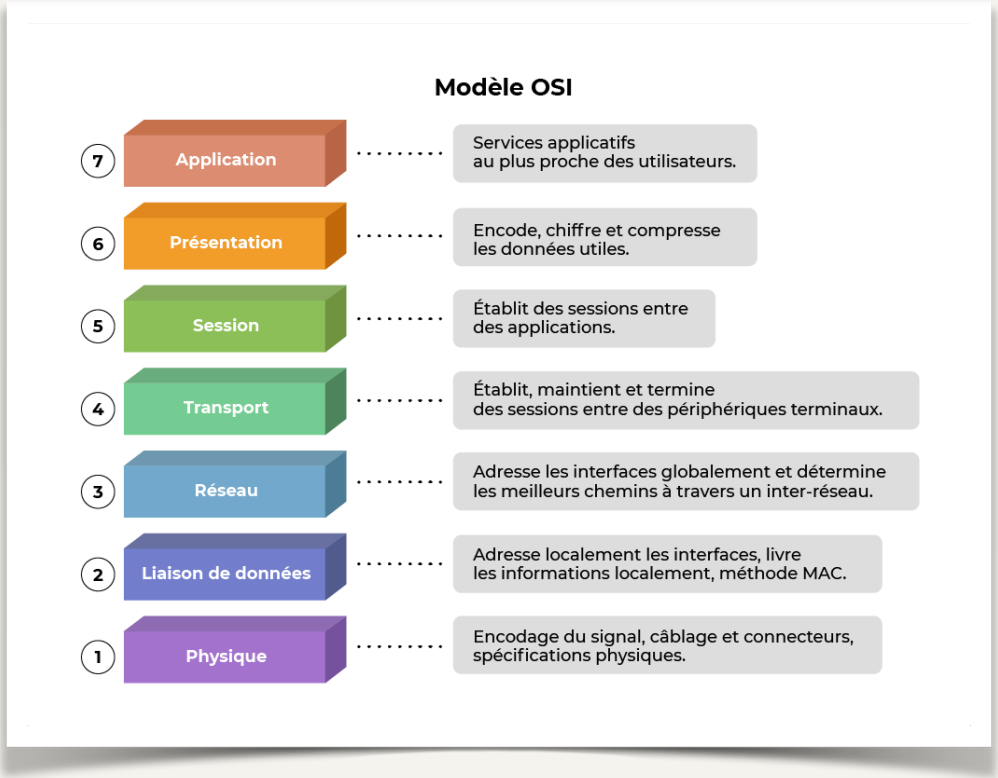
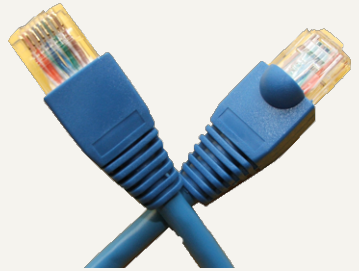


Fig 1.8 - Le modèle OSI

3 - Le modèle de référence OSI

Les sept couches du modèle OSI

Couche physique - Niveau physique - *Physical layer* - Couche 1



- Elle concerne le transfert de bits bruts sur un support physique, définissant les caractéristiques électriques et mécaniques des connexions.

Couche liaison de données - Niveau trame - *Data Link layer* - Couche 2

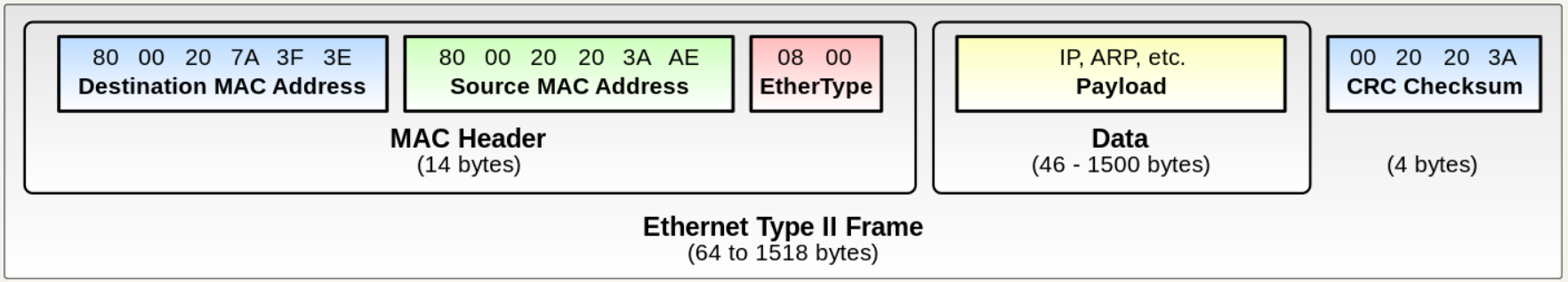
- Elle assure le transfert fiable de données entre deux nœuds adjacents, incluant la détection et la correction d'erreurs.
- [Pour un réseau à diffusion] Sous-couche MAC pour gérer et arbitrer les accès multiples au canal de transmission partagé
- 

Fig 1.9 - Trame Ethernet type II

3 - Le modèle de référence OSI

Les sept couches du modèle OSI

Couche réseau - Niveau paquet - *Network layer* - Couche 3

- Responsable du **routage** des paquets à travers le réseau, elle gère l'adressage logique et le choix des chemins.

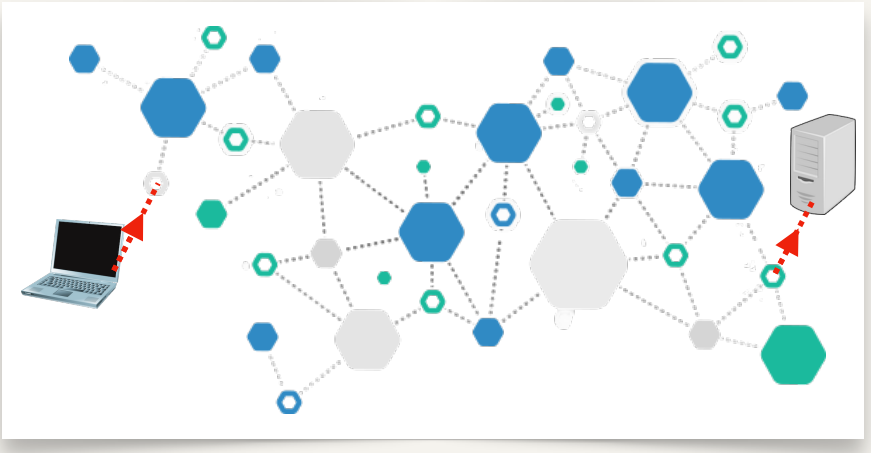


Fig 1.10 - Système de relais

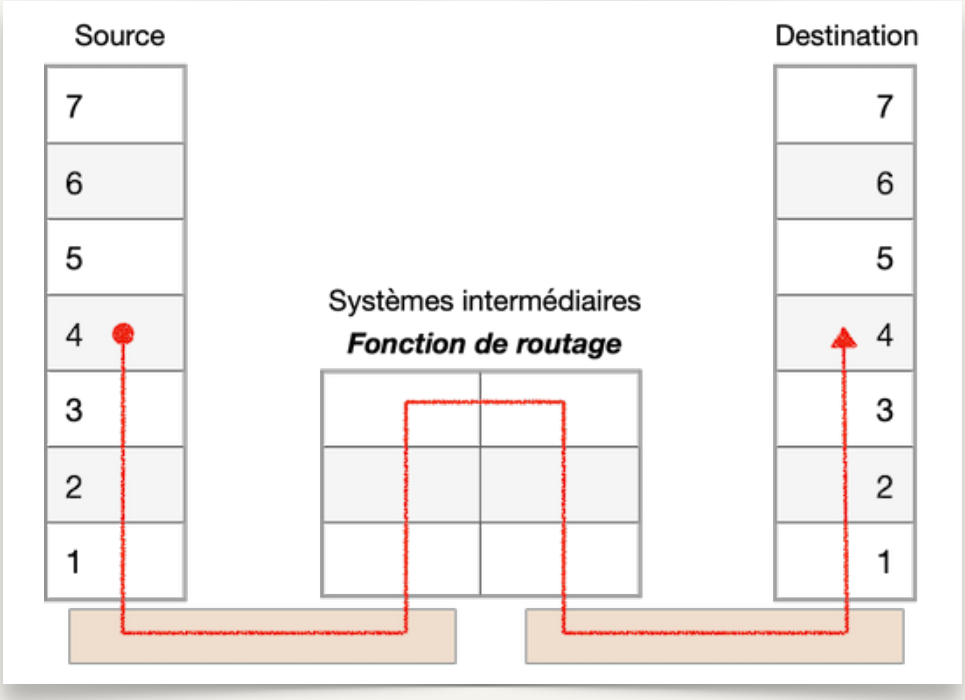


Fig 1.11 - Fonction de routage

3 - Le modèle de référence OSI

Les sept couches du modèle OSI

Couche transport - Niveau message - *Transport layer* - Couche 4

- Elle garantit un transfert de données fiable **entre systèmes finaux**, contrôlant le flux et la correction d'erreurs

Couche session - Niveau session - *Session layer* - Couche 5

- Elle gère les sessions de communication entre applications, incluant l'établissement, la gestion et la terminaison des connexions.

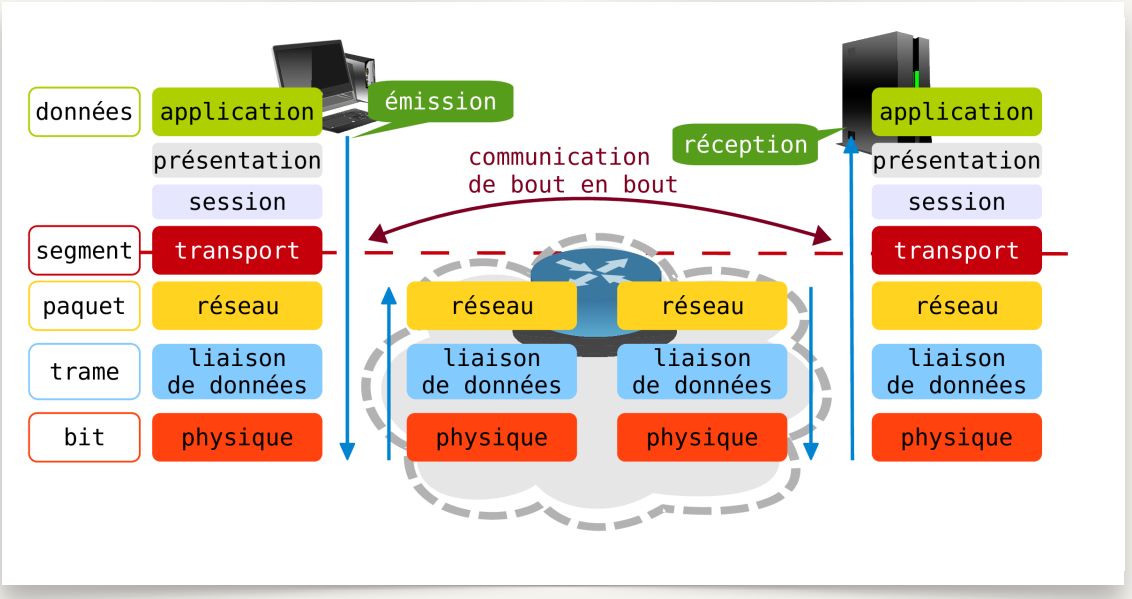


Fig 1.12 - Place de la couche transport dans le modèle OSI

3 - Le modèle de référence OSI

Les sept couches du modèle OSI

Couche présentation - Niveau présentation - *Presentation layer* - Couche 6

- Elle s'occupe de la traduction des données entre le format du réseau et celui des applications, assurant également l'encodage/décodage et la compression/décompression.

Couche application - Niveau application - *Application layer* - Couche 7

- Elle fournit des services réseau aux applications utilisateur, comme le courrier électronique ou le transfert de fichiers.

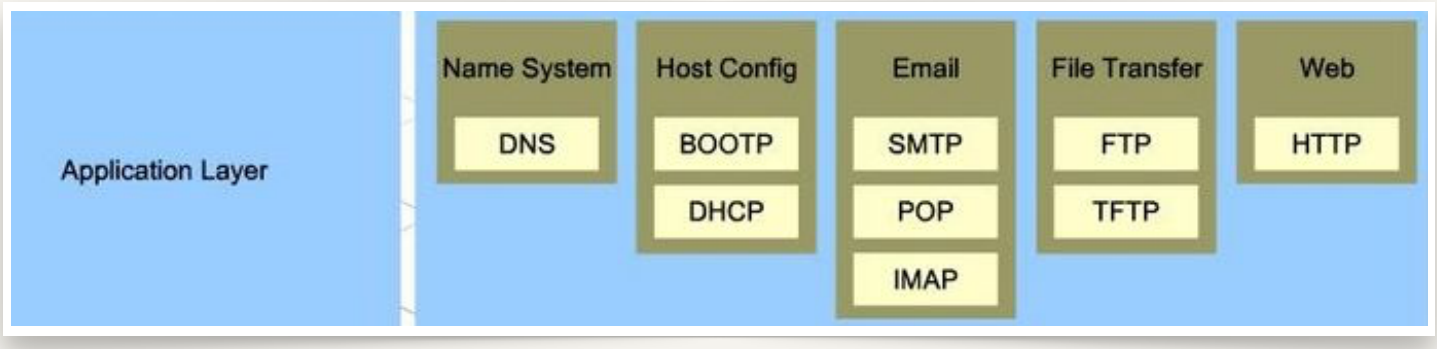


Fig 1.13 - Quelques protocoles de la couche application

4 - L'architecture TCP/IP

Internet

ARPANET - Internet

Une architecture [ou un modèle ?] à 4 couches

- Accès au sous-réseau
- Couche internet
- Couche transport
- Couche application

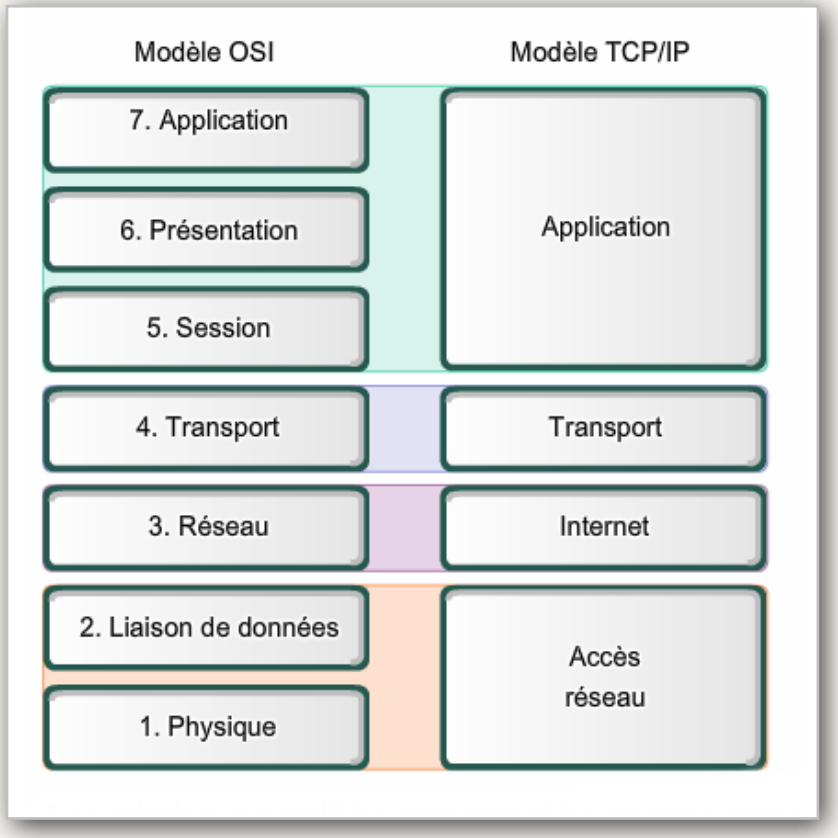
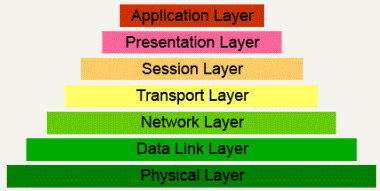


Fig 1.14 - Comparaison du modèle OSI et de l'architecture TCP/IP



4 - L'architecture TCP/IP

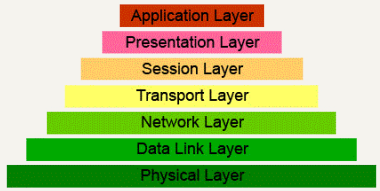
Les couches de l'architecture TCP/IP

Accès au sous-réseau (ou couche hôte-réseau)

- Non spécifiée par l'architecture TCP/IP
- Doit permettre le transfert de paquets entre hôte et routeur et entre routeurs
- Cette couche est liée au type de réseau utilisé (Ethernet, Wi-Fi, ATM…)

Couche internet

- Au niveau de la couche réseau d'OSI, son objectif est de permettre :
  - l'injection de paquets nommés **datagrammes** dans n'importe quel réseau
  - l'acheminement de ces datagrammes indépendamment les uns des autres jusqu'à destination
- Le protocole IP (*Internet Protocol*) est non fiable, sans connexion
- La couche internet assure le routage des datagrammes et la gestion des congestions

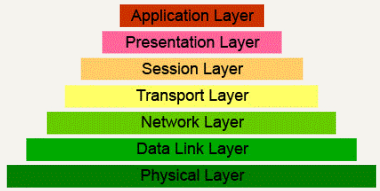


Les couches de l'architecture TCP/IP

Couche transport

- Au niveau de la couche transport d'OSI, elle définit principalement deux protocoles de bout en bout pour permettre le dialogue entre deux entités paires.
  - **TCP** : Transmission Control Protocol
  - **UDP** : User Datagram Protocol

- TCP : **Transmission Control Protocol**, est un protocole fiable orienté connexion. Il permet de remettre sans erreur un flux d'octets d'un hôte à un autre en le fragmentant en segments qui sont encapsulés par le protocole IP.
- UDP : **User Datagram Protocol**, est un protocole plus simple, non fiable et sans connexion, utile lorsque ni contrôle de flux, ni ordonnancement de données n'est nécessaire.



4 - L'architecture TCP/IP

Les couches de l'architecture TCP/IP

Couche application

- Cette couche regroupe les niveaux session, présentation et application du modèle OSI. Elle contient les protocoles de haut-niveau utilisés par les logiciels pour leur besoin de communication.
- Exemples de protocoles :
  - **Transfert de fichiers** : FTP, *File Transfer Protocol ;* SFTP, *Secure File Transfer Protocol…*
  - **Messagerie électronique** : SMTP, *Simple Mail Transfer Protocol ;* POP3, *Post Office Prot.;* IMAP, *Internet Message Access Prot. ;* MIME, *Multipurpose Internet Mail Extensions…*
  - **Messagerie instantanée** : XMPP, *Extensible Messaging and Presence Protocol,* alias *Jabber…*
  - **Travaux à distance** : Telnet ; ssh, *Secure shell*
  - **Consultation et gestion d'annuaires : LDAP,** *Lightweight Directory Access Protocol*
  - **Standards et outils du web :** HTTP, *HyperText Transfer Prot. ;* URI, *Uniform Resource Identifier ;* HTML, *HyperText Markup Language ;* CGI, *Common Gateway Interface…*
  - **Traduction de nom de domaine en adresse IP** *:* DNS, *Domain Name System*
  - **Autres** : NFS, *Network File System ;* SNMP, *Simple Network Management Protocol ;* DHCP, *Dynamic Host Configuration Protocol ; etc.*

La couche application

Exemple : Requête d'une page web

- L'internaute clique sur un lien http://example.com pour afficher une page web
- De façon détaillée, **qu'est-ce qu'il se passe ?**

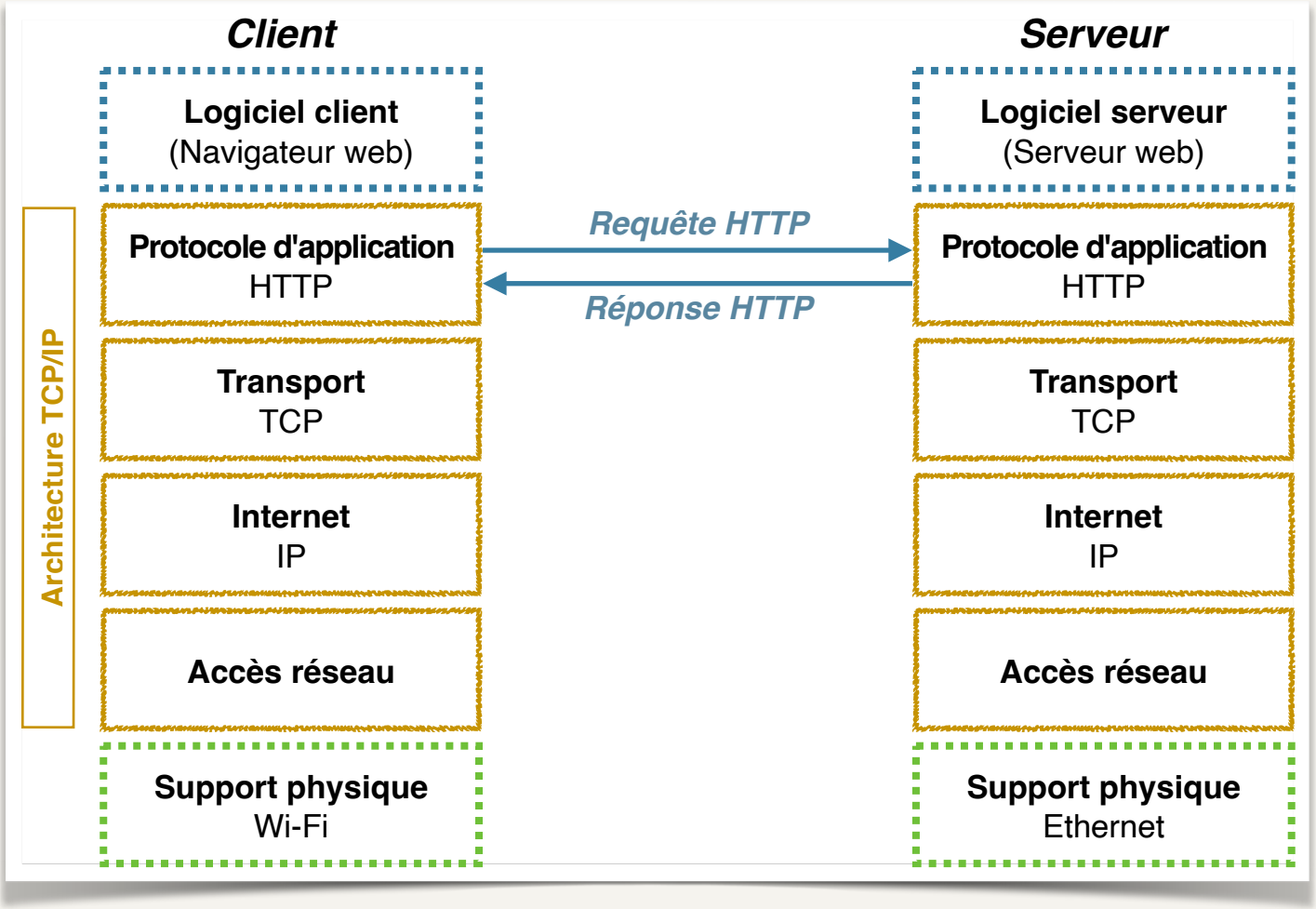
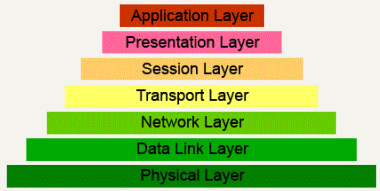


Fig 1.15 - Requête d'une page web

La couche application

Exemple : Requête d'une page web (suite…)

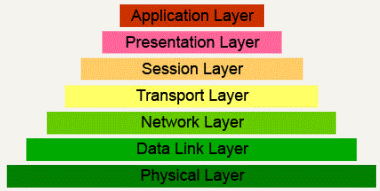
- Le navigateur web
  - analyse le lien ;
  - détermine l'adresse IP du serveur via DNS : *qui est example.com ? 93.184.216.34 ;*
  - utilise HTTP ;
- HTTP (*HyperText Transfer Protocol)* envoie une requête pour obtenir une ressource sur le serveur web *example.com* : *GET / HTTP/1.1…*
  - Il utilise TCP pour le transport…
  - d'une requête GET ;
- TCP (*Transmission Control Protocol*) envoie un segment pour *93.184.216.34:80*
  - en utilisant IP (*Internet Protocol*) ;



La couche application

Exemple : Requête d'une page web (suite…)

- IP envoie un datagramme vers son routeur, pour *93.184.216.34*
  - son adresse IP source et l'adresse IP *93.184.216.34* du serveur sont spécifiés dans l'en-tête du datagramme ;
  - Il utilise la couche d'accès au réseau ;
- Qui créée les trames Wi-Fi nécessaires ;
- Qui seront codés par l'émetteur Wi-Fi pour les transmettre au routeur Wi-Fi. Le routeur trouve la route vers le serveur web et achemine le datagramme ;
- Le dernier routeur utilise Ethernet pour transmettre les trames du datagramme au serveur web *93.184.216.34*



La couche application

Exemple : Requête d'une page web (suite…)

- Sur le serveur, **trames**, puis **datagramme** IP, puis **segment** TCP sont décapsulés pour fournir au processus HTTP la requête ***GET / HTTP/1.1…***
- HTTP
  - analyse la requête,
  - recherche la ressource
  - l'inclue dans la réponse HTTP : ***HTTP/1.1 200 OK…***
- Cette réponse sera transmise au client via TCP, **avec toutes les étapes inverses**
- HTTP du client obtient la réponse via TCP
- Le navigateur web
  - interprète cette réponse
  - l'affiche s'il dispose de toutes les ressources nécessaires
  - (sinon, il sollicite HTTP pour obtenir les ressources qu'il n'a pas en cache)

- Voir aussi : https://www.wireshark.org/

Contenu du chapitre

- Les autoroutes de l'information : nids de poules et travaux en tous genres **(couche physique)**
  - Concepts et problèmes de la transmission de données : erreurs de transmission, le contrôle d'erreur, notion de bande passante, traitement des signaux, atténuation, modulation, multiplexage, commutation, synchronisation d'horloge, problèmes de caractère et de bit stuffing.

Rappel : rôle de la couche physique du modèle OSI

Couche physique - Niveau physique - ***Physical layer***

- Transfert de **train de bits** d'information sur le support physique
- unité de PDU : bit

- Définition des **supports physiques** et des moyens d'y accéder

- Spécifications des interfaces :
  - **mécaniques** (définition, dimension des connecteurs)
  - **électriques**
  - **fonctionnelles**

- Moyens d'adaptation
  - Transformation de trains de bits en **signaux** adaptés au support, et vice-versa.

1 - Préambule

Le contrôle physique du circuit de données

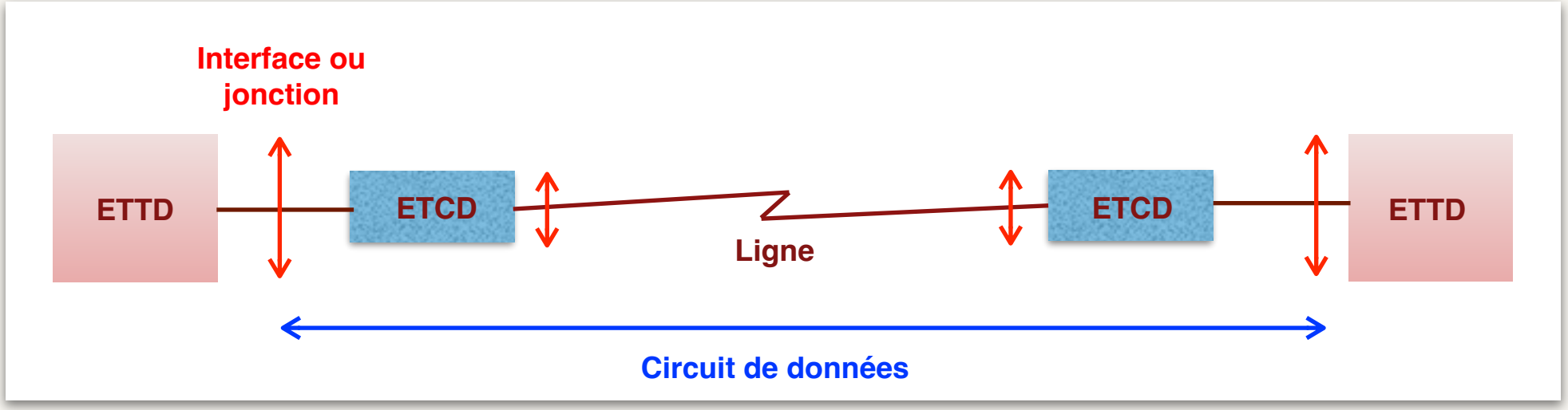


Fig 2.1 - Le circuit de données

ETTD : Équipement Terminal de Traitement de données

- DTE : *Data terminal equipment*
- Ex. : **Ordinateur**, terminal, imprimante…

ETCD : Équipement Terminal de Circuit de données

- DCE : *Data circuit-terminating equipment*
- Ex. : **Modem**
- L'ETCD gère la liaison de la ligne à chaque extrémité et adapte le signal binaire entre l'ETTD et la ligne de transmission via un codage et/ou une modulation

Définitions

Information analogique

- Liée à la variation continue d'un phénomène physique

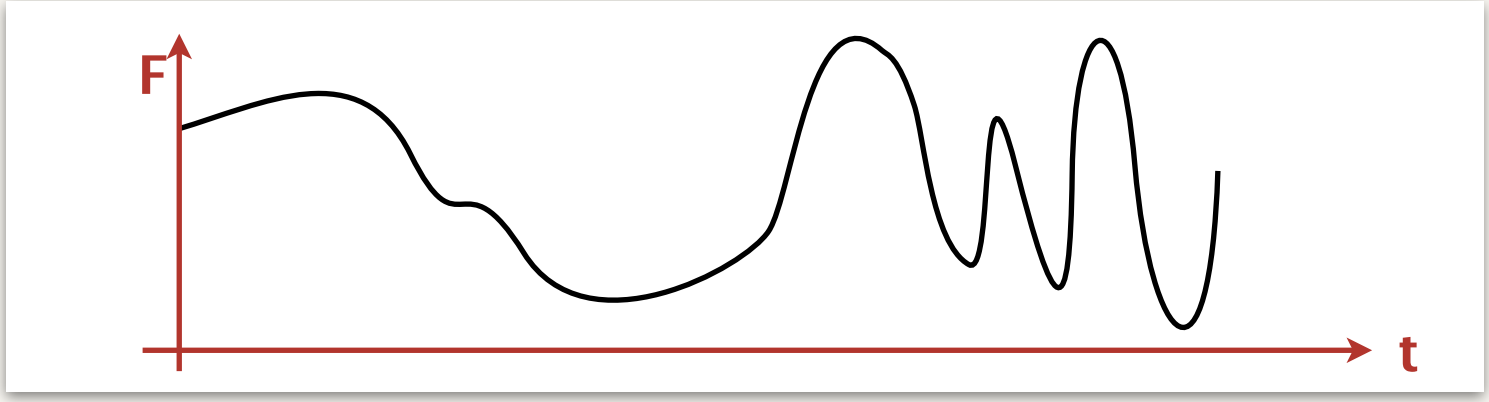


Fig 2.2 - variation continu de F en fonction du temps

Information numérique

- Elle résulte :
  - d'une source discontinue (ou discrète) ;
    - où les variables ne peuvent avoir qu'un nombre fini de valeurs
  - de l'assemblage d'éléments indépendants (alphabet...)
  - de la numérisation d'une information analogique
    - (=> échantillonnage, quantification et codage)

Définitions

Bit

- Unité d'information
- `0 | 1`

- Les **supports physiques** véhiculent des signaux qui représentent les informations transmises
  - Support métallique => signaux électriques
  - Ondes radio
  - Infrarouge
  - Fibre optique => Ondes optiques

- La transmission sur le support passe par des technique de
  - **codage en bande de base**
  - ou de **modulation**

Définitions

Débit binaire *(bitrate* ou *bit rate)*

- Nombre de bits par seconde émis sur le support de transmission
- Quantité de données transmises dans un intervalle de temps fixé

$$D = \frac{V}{T}$$

D : débit binaire en bit/s
V : Volume d'information en bit
T : durée d'émission

Fig 2.3 - Débit binaire

Un débit s'exprime en **bit/s** (ou ses multiples : kbit/s ; Mbit/s ; Gbit/s…)

- ⚠ **Éviter** :
  - *bps*
  - octet/s ; 1 ko/s… (mais concevable pour la **couche application**)

Définitions

Latence *(lag)*

- Temps de transit entre l'émission d'un bit et sa réception
- Cela inclus le temps de propagation sur les supports et les temps de traitement par les équipements actifs du réseau
- La latence se mesure en millisecondes (ms).

Gigue *(jitter)*

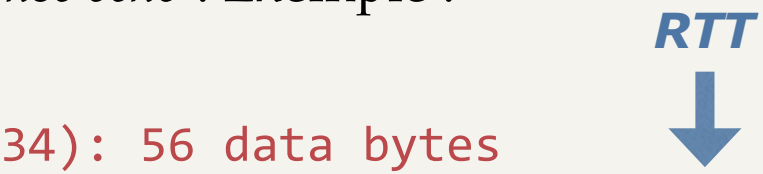
- **Variation** de la latence dans le temps
- Une gigue faible indique une connexion stable
- La gigue se mesure en millisecondes (ms).

Définitions

Délai d'attente aller-retour (***RTT***, *round-trip time* ou ***RTD***, *round-trip delay time*)

- Temps que met un signal pour parcourir l'ensemble d'un circuit fermé.
- la commande `ping` mesure, entre autres, le délai entre l'envoi d'une requête ICMP '*echo-request*' et la réponse '*réponse echo*'. Exemple :

```
$ ping -c3 example.com
PING example.com (93.184.216.34): 56 data bytes
64 bytes from 93.184.216.34: icmp_seq=0 ttl=56 time=86.834 ms
64 bytes from 93.184.216.34: icmp_seq=1 ttl=56 time=86.859 ms
64 bytes from 93.184.216.34: icmp_seq=2 ttl=56 time=86.612 ms
--- example.com ping statistics ---
3 packets transmitted, 3 packets received, 0.0% packet loss
round-trip min/avg/max/stddev = 86.612/86.768/86.859/0.111 ms
```



Définitions

Codage

- Faire correspondre à chaque symbole d'un alphabet une représentation binaire (un mot-code)
- L'ensemble des mots-code = **le code**
- Exemple :
  - Code ASCII (voir ascii-table.pdf) ;
  - Unicode

@	64	40	At sign
A	65	41	Capital A
B	66	42	Capital B
C	67	43	Capital C
D	68	44	Capital D
E	69	45	Capital E
F	70	46	Capital F
G	71	47	Capital G
H	72	48	Capital H
I	73	49	Capital I
J	74	4A	Capital J

Fig 2.4 - Extrait du code ASCII

Définitions

Bande passante *(bandwidth)*

- C'est une caractéristique physique d'un **support de transmission**, mesurée en hertz (Hz)
- Largeur de la bande de fréquences des signaux qui sont transmis correctement (sans affaiblissement dommageable)
- Pour transmettre, **il faut de la bande passante !**
- => Éviter ou réduire :
  - les bruits (dûs aux champs électro-magnétique, …),
  - les interférences (ondes radio, …)
  - les atténuations (longueur et nature du support, …)
- La bande passante est généralement définie à -3 dB, d'où une atténuation en puissance de moitié.
  - Exemple : la bande passante d'une paire téléphonique du **Réseau Téléphonique Commuté** est de 300 - 3 400 Hz.

La **largeur de bande** (*Spectral width*) est une caractéristique du **signal.**

- On étudie le spectre du signal pour déterminer sa largeur de bande.
- La bande passante du support doit être plus large que la largeur de bande pour éviter une déformation lors de la transmission.

Adaptation du signal à transmettre

Transcodage ou codage en ligne

- Un signal binaire ne peut être transmit sans adaptation sur une ligne de transmission

Fig 2.4. - Codage en ligne

Types de codage en ligne

- Codage en **bande de base**
- Codage **complets**
- **Modulation** : transmission en **large bande**

Challenge

- Obtenir plus de débits, avec peu d'énergie.
- En associant différents types de codage.

La modulation

Une porteuse à haute fréquence (HF) est modulée par le signal de données.

Trois types de modulations :

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

Le codage à transmettre subit une translation de fréquence, autour de la fréquence centrale

- Réduction de la dispersion d'harmonique

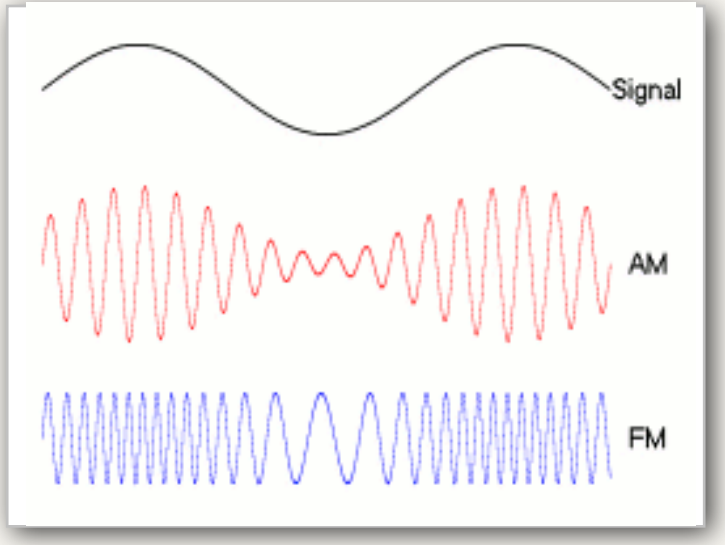


Fig 2.5 - Modulation AM et FM

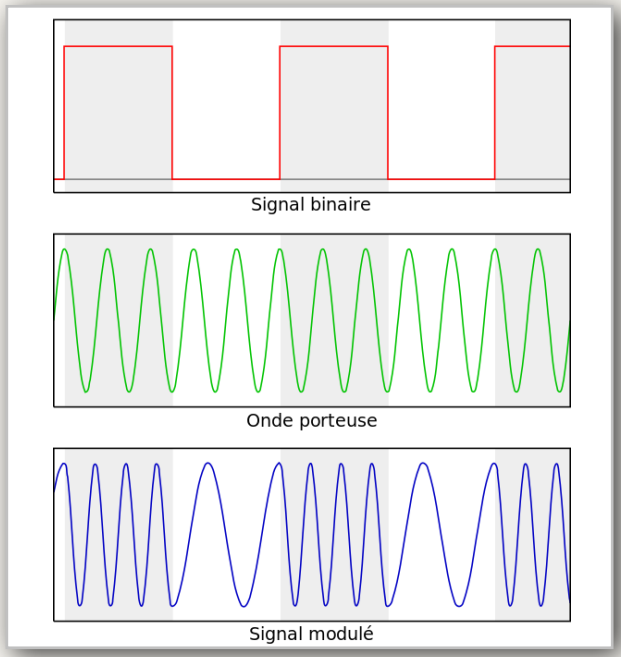


Fig 2.6 - Modulation de fréquence

La modulation

Modulation d'amplitude

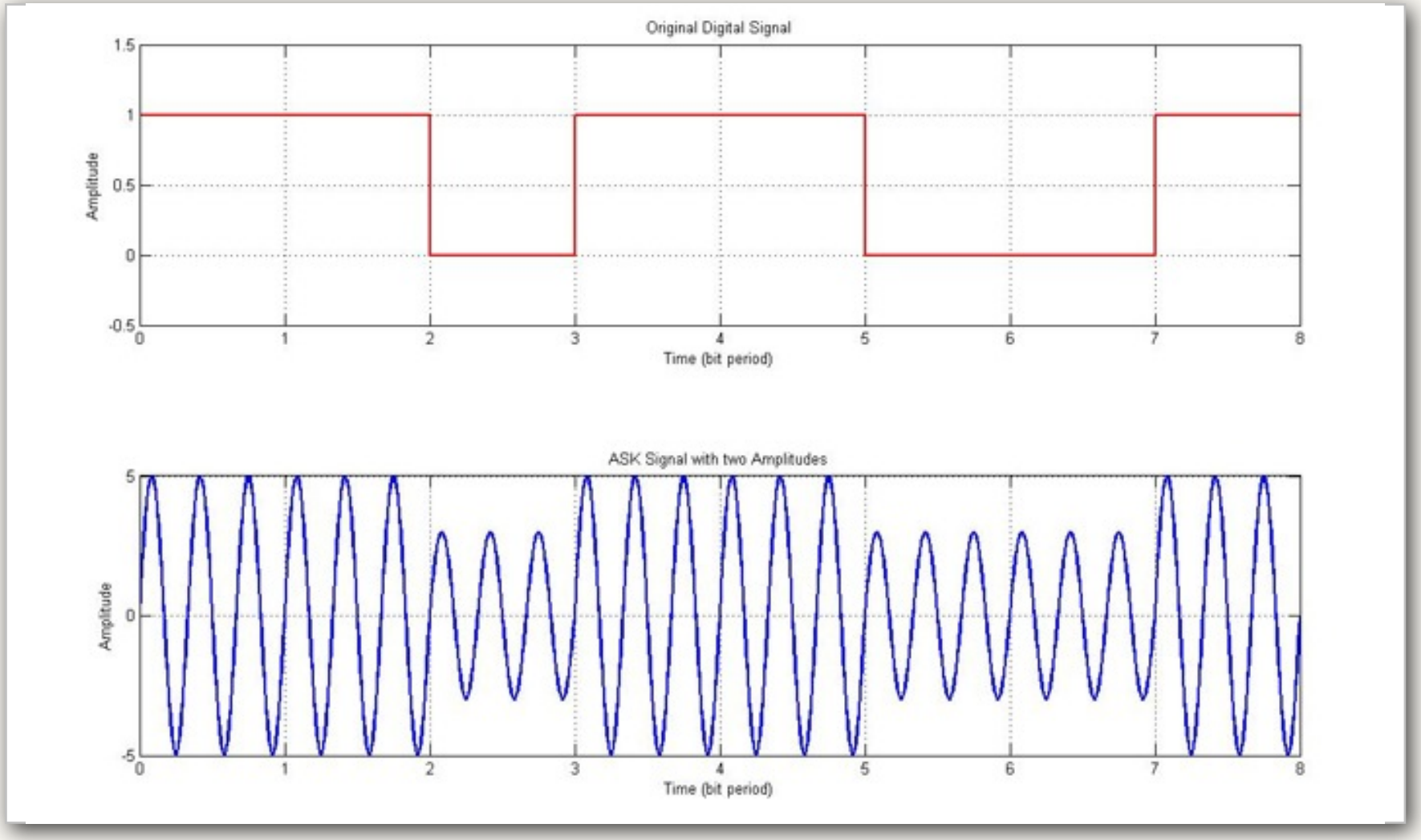


Fig 2.7 - Modulation d'amplitude

La modulation

Modulation de fréquence

- F*requency-shift keying* (FSK)
- Modulation par déplacement de fréquence (MDF)

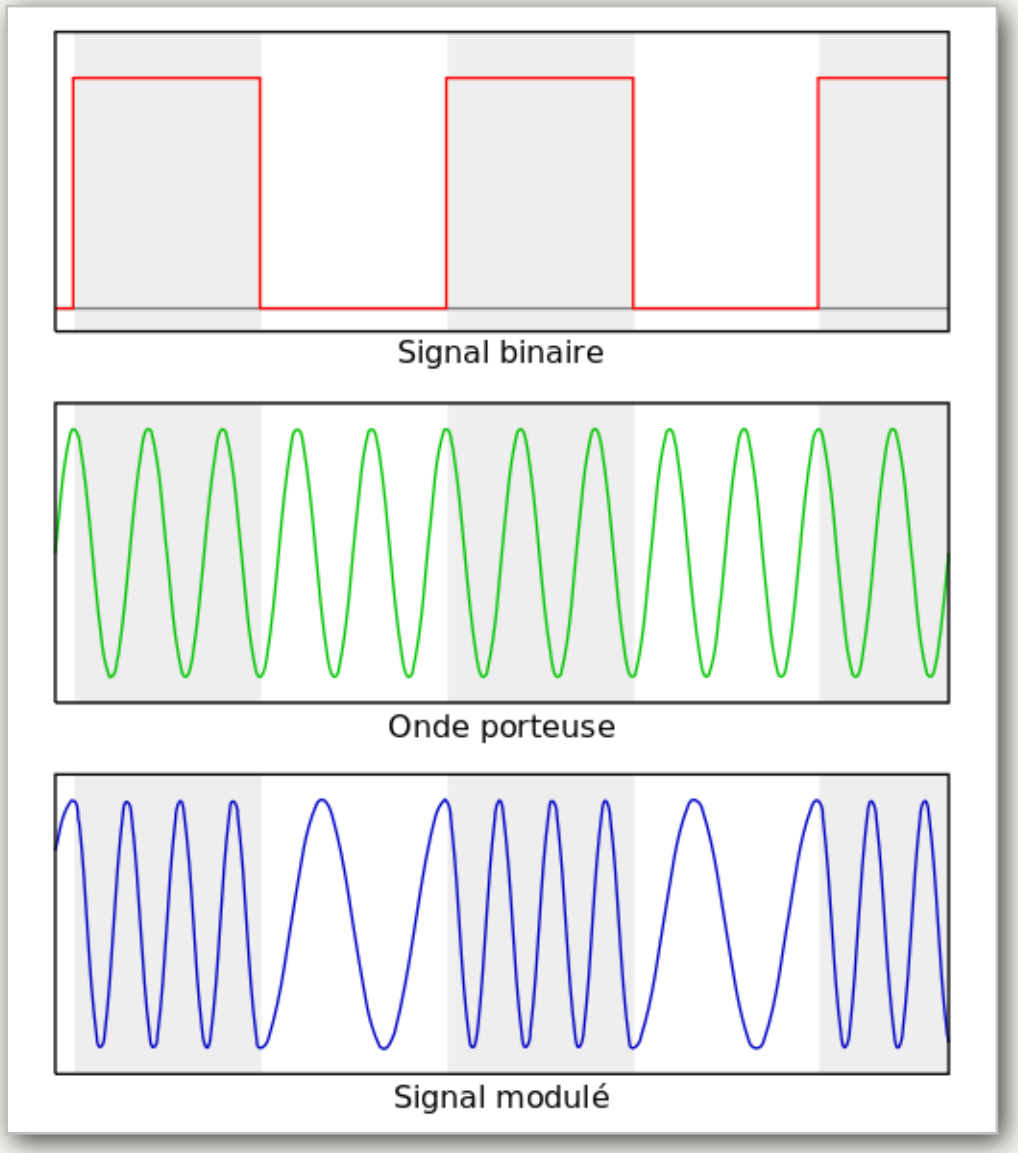


Fig 2.8 - Modulation de fréquence

La modulation

Modulation d'amplitude en quadrature

- Modulation d'**amplitude** et de **phase**
- *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)
- Voir : https://claude-gimenes.fr/fr/p/21/509/2957

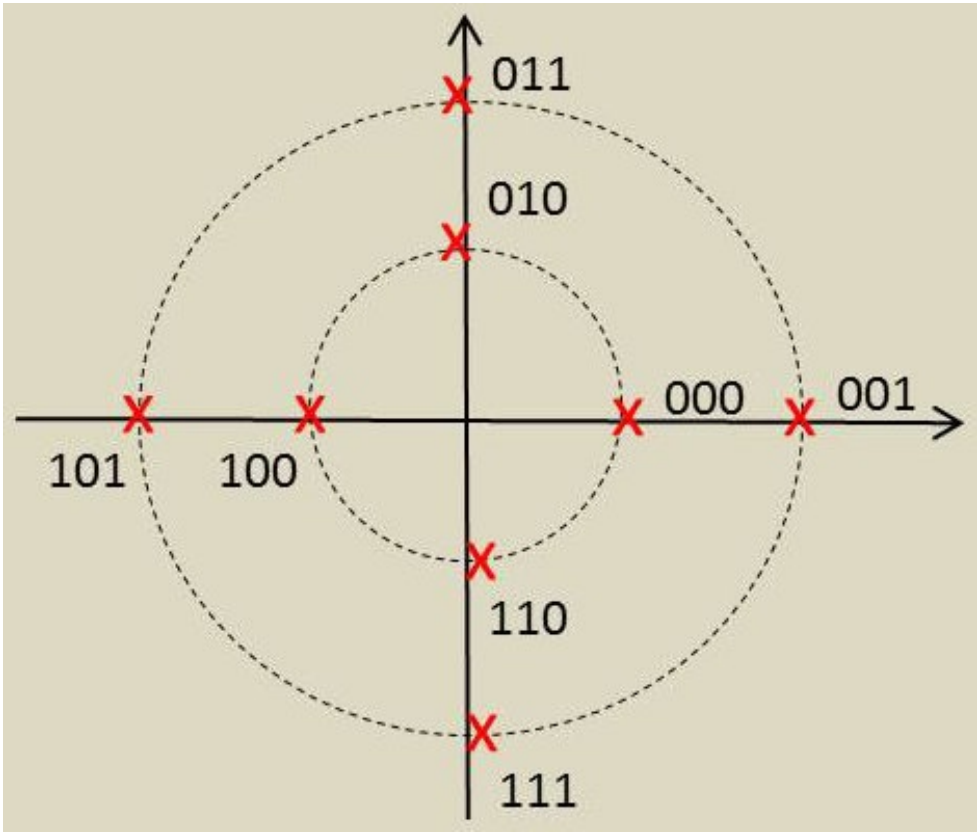


Diagramme de constellation
QAM à 8 états

Fig 2.9 - Modulation d'amplitude en quadrature

La modulation

Modem ; transmission en large bande

- L'émetteur réalise la **modulation** avec un ***modulateur.***
- Le récepteur utilise un ***démodulateur*** pour restituer les données d'origine.
- Dans un ETCD (Équipement Terminal de Circuit de données), ces deux fonctions sont réalisées par un ***modem.***
- La transmission de signaux modulés est appelée **transmission en large bande.**

Quantifier le débit en fonction de la bande passante

Théorème de Shannon ou d'échantillonnage :

- La fréquence d'échantillonnage $F_{éch}$ doit être en rapport avec F_{max}, la plus grande fréquence du signal à convertir :
- $F_{éch} \geq 2 F_{max}$

Rapport signal / bruit = Signal / Noise = **S/N**

- Rapport entre la puissance **S** du signal transmis et la puissance **N** du bruit, souvent exprimé en décibel (dB) :
- $S/N_{db} = 10 \log_{10} (P_S / P_N)$
  - Exemple : $P_S / P_N = 100$ => $S/N_{db} = 20$ dB

Formule de Shannon : débit en fonction du bruit. Cela permet d'évaluer une **capacité de transmission** C d'un canal bruité :

- $C = W \log_2 (1 + S/N)$
  - C : Débit max. ; capacité de transmission, en **bit/s**
  - W : Bande passante du canal de transmission, en **Hz**
  - S/N : Rapport signal sur bruit (en valeur — pas en dB)

Quantifier le débit en fonction de la bande passante

Rapidité de modulation (ou rapidité de transmission)

- La rapidité de modulation R, exprimé en bauds (bd), mesure le nombre de signaux transmits par unité de temps.
- $D = R \log_2 (V)$
  - D : débit binaire, en bit/s
  - R : rapidité de modulation en bd (baud)
  - V : valence du signal ; nombre d'états significatifs possibles du signal
    - Pour un signal bivalent,V=2 et D = R
    - Pour un signal quadrivalent, V=4 et D = 2 R

Formule de Nyquist

- $D_{max} = 2 W \log_2 (V)$
  - D_{max} : Débit max., en **bit/s**
  - W : Bande passante du canal de transmission, en **Hz**
  - V : Valence ; correspond au nombre de niveaux significatifs d'un signal.

Définitions

- La commutation est l'action d'associer temporairement des voies de transmission ou des circuits de télécommunication pendant la durée nécessaire au transfert de l'information.
- Les types de commutation
  - **Commutation de circuits** (*circuit switching*)
    - Établir un circuit de bout-en-bout entre deux utilisateurs avant toute transmission d'informations.
    - Monopoliser ce circuit pendant toute la communication.
    - Libérer le circuit au terme de la communication.
    - **Exemple** : Pour établir une communication téléphonique entre 2 abonnés A et B, un circuit physique doit être établi à travers les différents relais du système téléphonique.

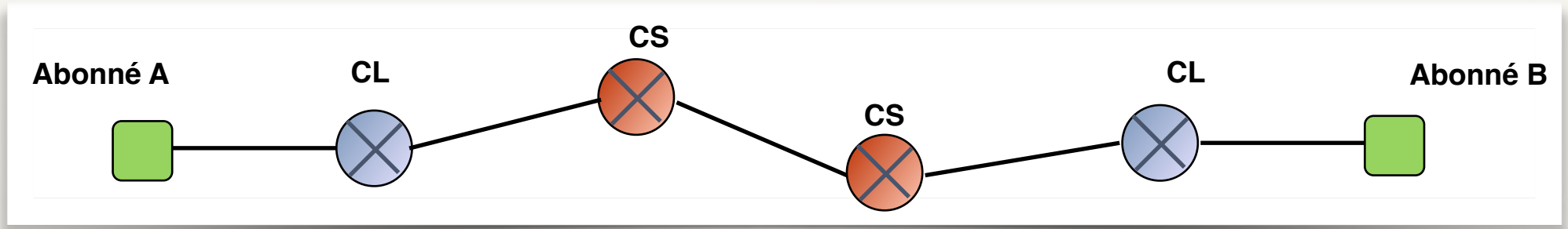


Fig 2.12 - Liaison téléphonique entre 2 abonnés

Définitions

- **Commutation de messages**
  - La source constitue un **message** à partir d'un bloc de données et le fait passer au commutateur auquel il est raccordé.
  - Le commutateur
    - **stocke** le message
    - le **vérifie**
    - trouve la route pour le **faire suivre** vers le destinataire
    - le transmet au commutateur suivant
  - Technique nommée « **Store & forward** », traduit par « **Stocker, vérifier, faire suivre** »
  - Ancêtre : le système télégraphique

Fig 2.13 - Système télégraphique

Définitions

- **Commutation de paquets** (*packet switching*)
  - C'est une commutation de messages, avec une taille **réduite** et **fixe** des messages
  - Le bloc de données est donc fragmenté par l'émetteur en paquets (ou en trames)
  - Les nœuds de transfert traitent ces paquets rapidement car :
    - stockés en RAM et non sur disque
    - algorithmes plus simples *(à cause de la taille fixe des paquets)*
    - Technique nommée « **Store & forward** »
    - Mais on traduit par : « **Stocker, vérifier, faire suivre** »
  - Nœuds de transfert : **routeurs** et **commutateurs**

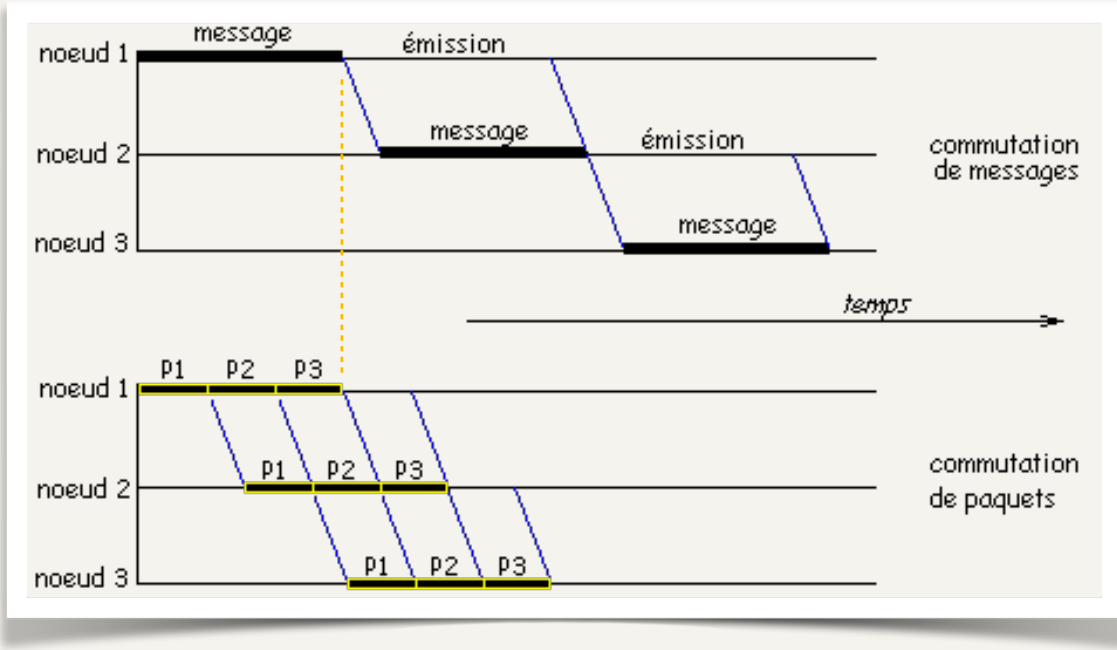
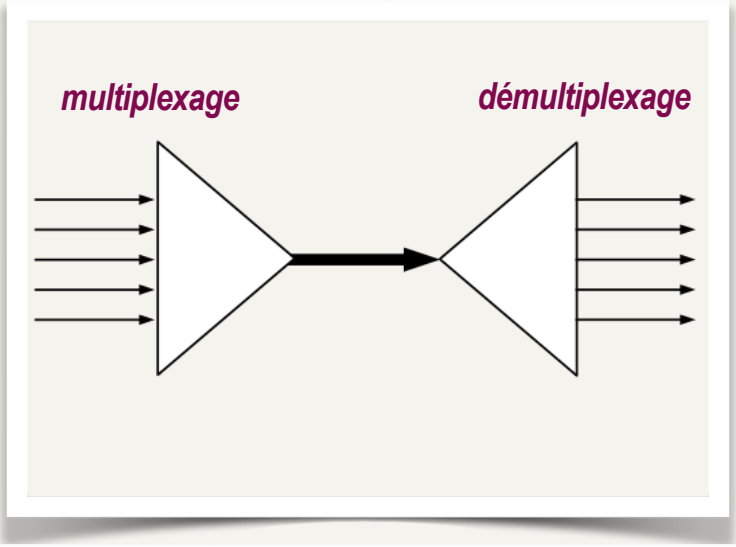


Fig 2.14 - Commutation de messages vs commutation de paquets

4 - Le multiplexage

Définitions

- Le **multiplexage** (*Multiplexing*) est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations dans un même canal.
  - Il existe deux techniques principales de multiplexage : fréquentiel et temporel
  - Démultiplexage : opération inverse



- **Voie composite** ou **voie haute vitesse :** canal de transmission entre 2 multiplexeurs / démultiplexeurs

  Voies basse vitesse : les voies incidentes

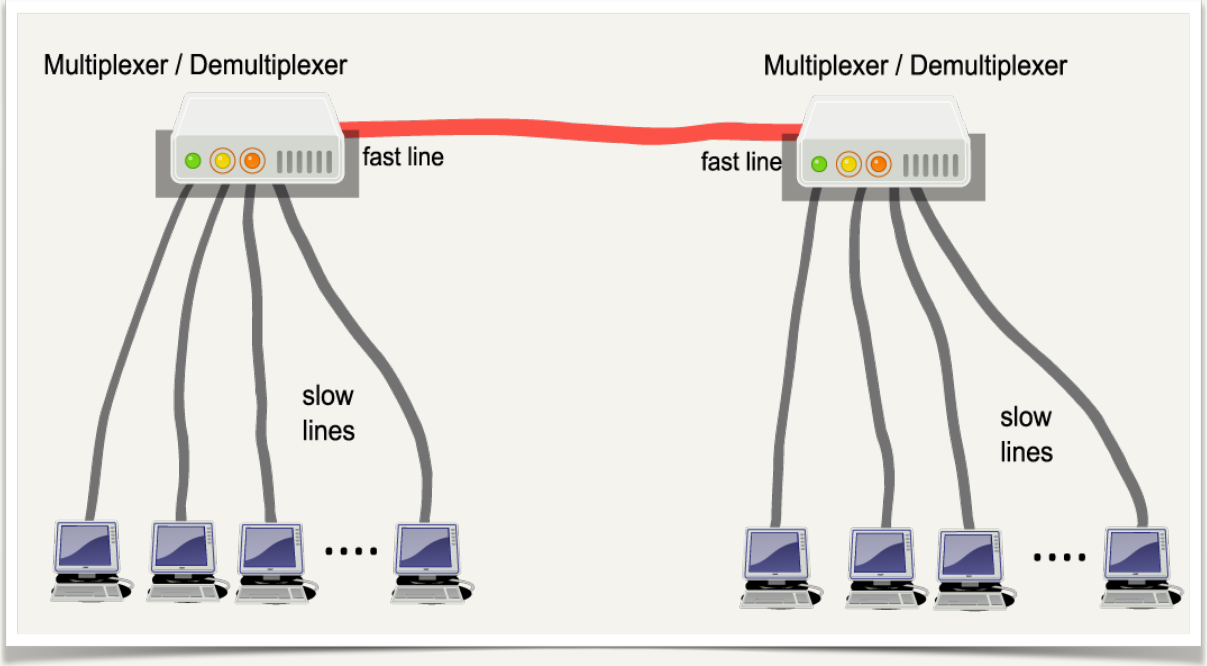


Fig 2.15. - Multiplexage

Multiplexage fréquentiel ; FDM

- **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*)
  - MRF (Multiplexage par répartition de fréquence)
  - La bande passante de la voie composite est partagée en une série de sous-bandes, ou canaux

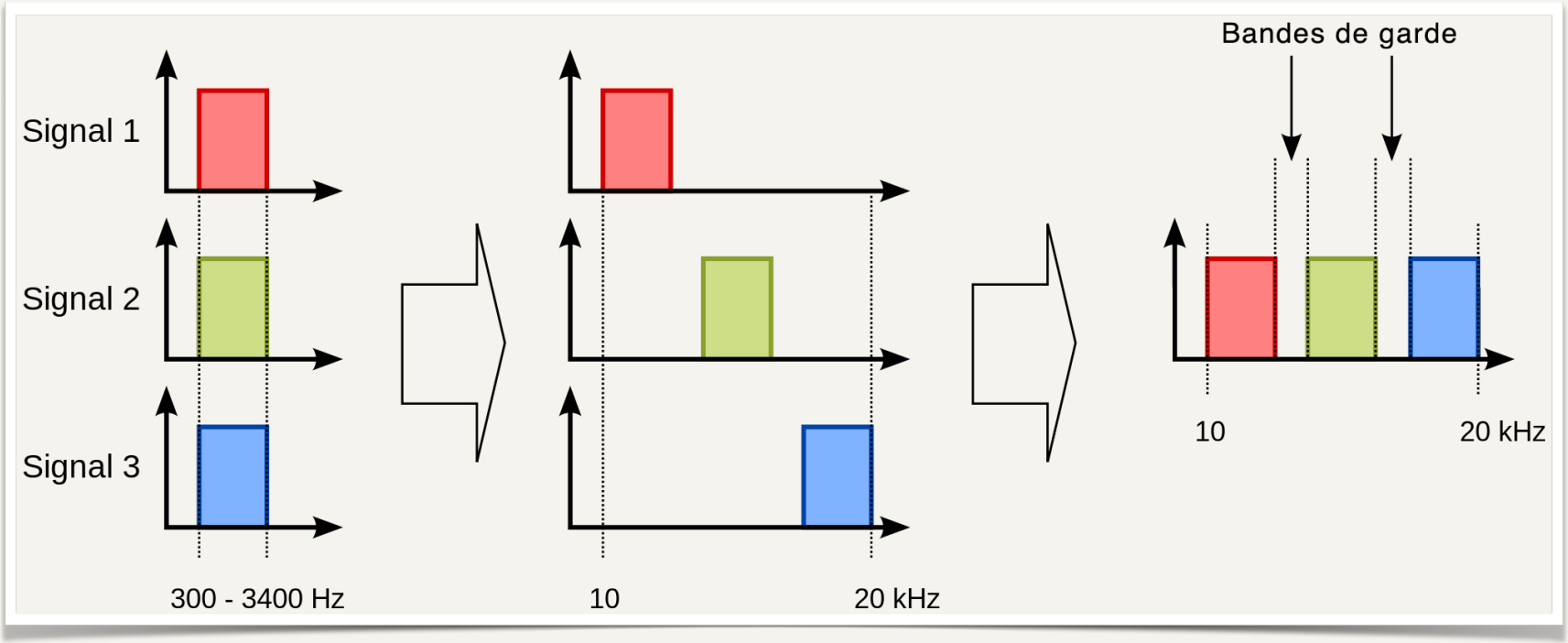


Fig 2.16. - Multiplexage fréquentiel

Multiplexage fréquentiel ; FDM

- **ADSL** (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) combine deux techniques de modulation :
  - **FDM**
  - la modulation **DMT** (*Discrete MultiTone*)

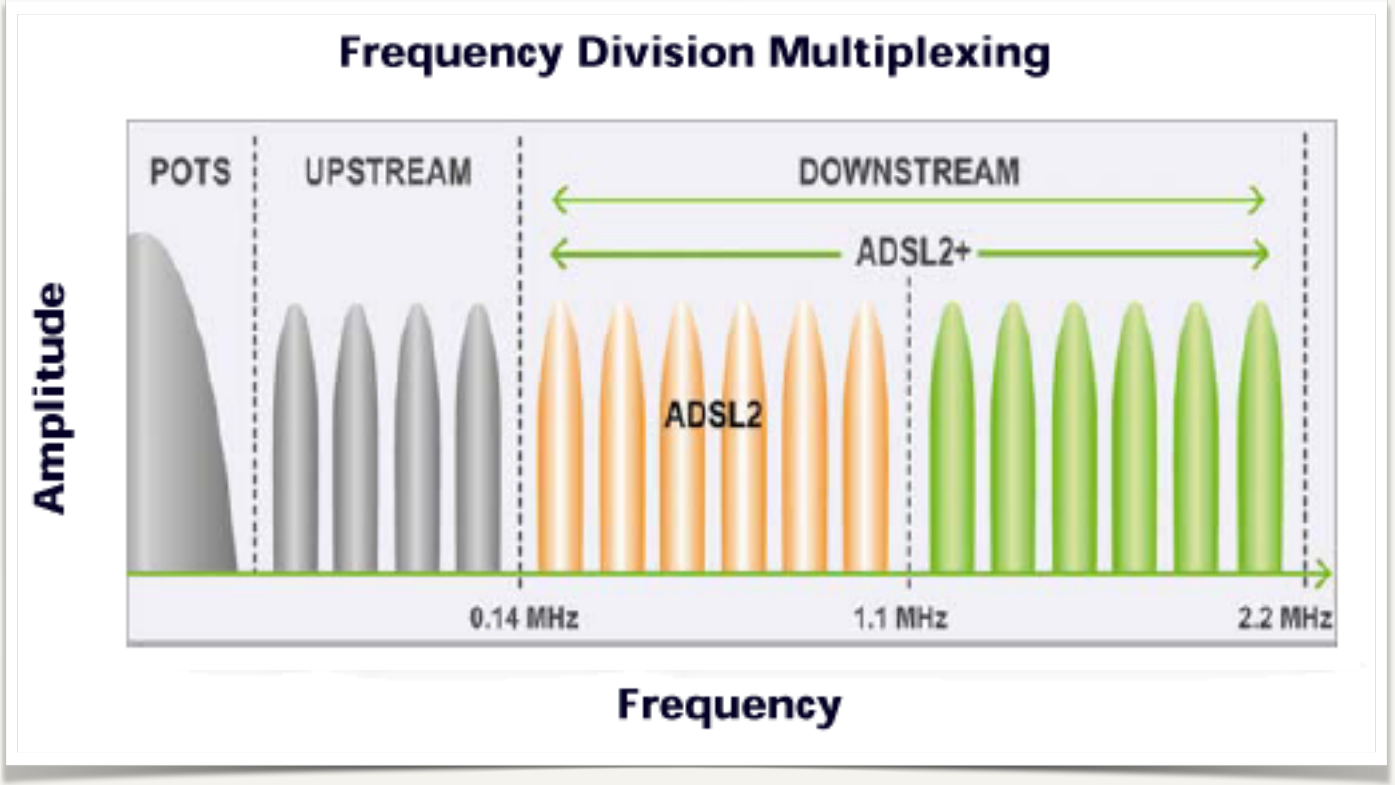


Fig 2.17. - ADSL

Multiplexage temporel ; TDM

- TDM (*Time Division Multiplexing*)
  - AMRT (Accès Multiple à répartition dans le temps)
  - Les utilisateurs émettent chacun leur tour pendant un bref intervalle de temps (IT).
  - La totalité de la bande passante de la voie composite est donc allouée à chaque utilisateur à tour de rôle.

Fig 2.18. - Multiplexage temporel

5 - Topologies

Topologie physique ou topologie logique

- Bus
- Anneau
- Arbre
- Réseau maillé
- Étoile

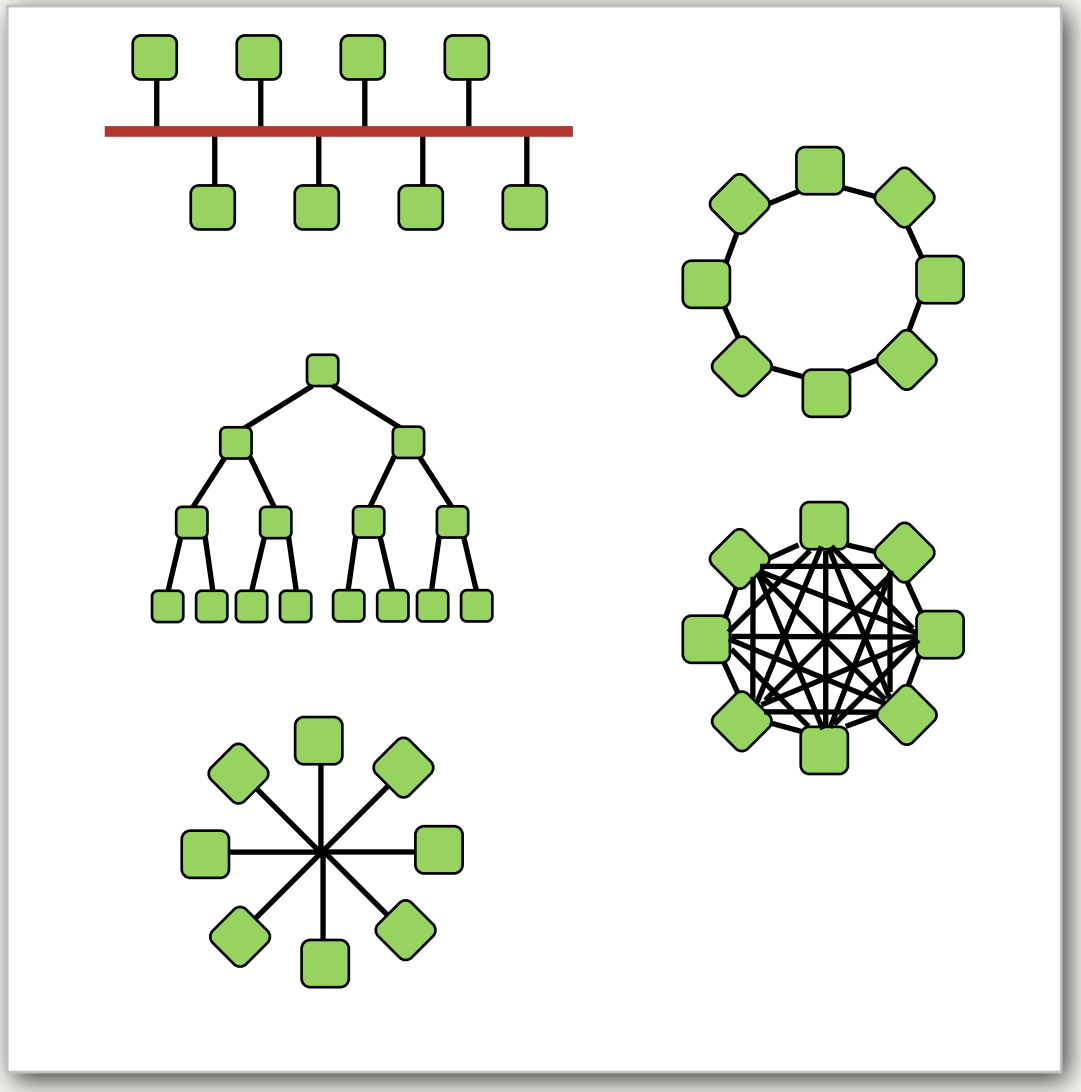


Fig 2.19 - Différentes topologies

Voir Annexe (hors cours) :

https://utc505.seancetenante.com/documents/Annexe-1-Support-physique-Telephonie.pdf

1 - Préambule

Contenu du chapitre

- *Collectivisme ou Libre entreprise… à la recherche d'un modèle équitable*
  - Grandes familles de protocoles à compétition et à coopération, détail sur CSMA/CD et CSMA/CA en mode infrastructure. Ponts et commutation.

2 - Objectif de la couche liaison de données

Rappels

Couche liaison de données - Niveau trame - *Data Link layer*

- Transfert de **trames** entre deux systèmes adjacents
- Établissement, maintient, contrôle et libération du **lien logique** entre les deux entités
- Constitution et transmission de trames **bien délimitées**
- **Détection** et correction d'erreurs
- [Pour un réseau à diffusion] **Sous-couche MAC** pour gérer et arbitrer les accès multiples au canal de transmission partagé

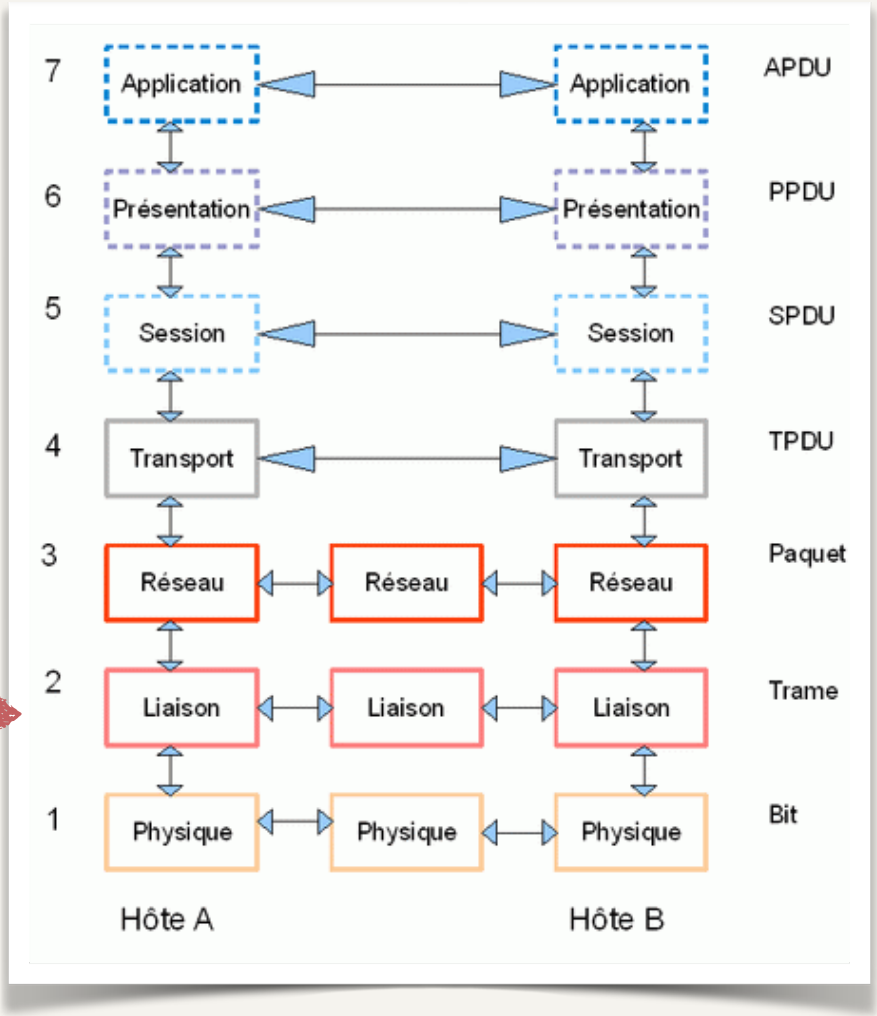


Fig 3.1 - Le modèle OSI

2 - Objectif de la couche liaison de données

Services offerts

La couche liaison de données **fournie** à la couche réseau les services nécessaires pour transmettre les paquets d'un nœud source à un nœud destination adjacent.

On distingue trois catégories de service

- **Service sans connexion et sans accusé de réception**
  - À condition que les taux d'erreur soient faibles et que les corrections ou reprises sur erreur soient assurées dans une couche supérieure
  - C'est le cas de **LAN** (*Local Area Network*), de trafic temps réel, de support fiable
- **Service sans connexion et avec accusé de réception**
  - Le récepteur doit acquitter chaque trame reçue
  - Cas de liaison peu fiable (**réseau sans fil** par ex.)
- **Service avec connexion et avec accusé de réception**
  - La liaison de données garantie que chaque trame est reçue, une fois et une seule, dans l'ordre d'émission

2 - Objectif de la couche liaison de données

Services offerts

Les service avec accusé de réception impliquent un contrôle d'erreur et une gestion des acquittements.

Les scénarios à prévoir sont décrits avec cette figure.

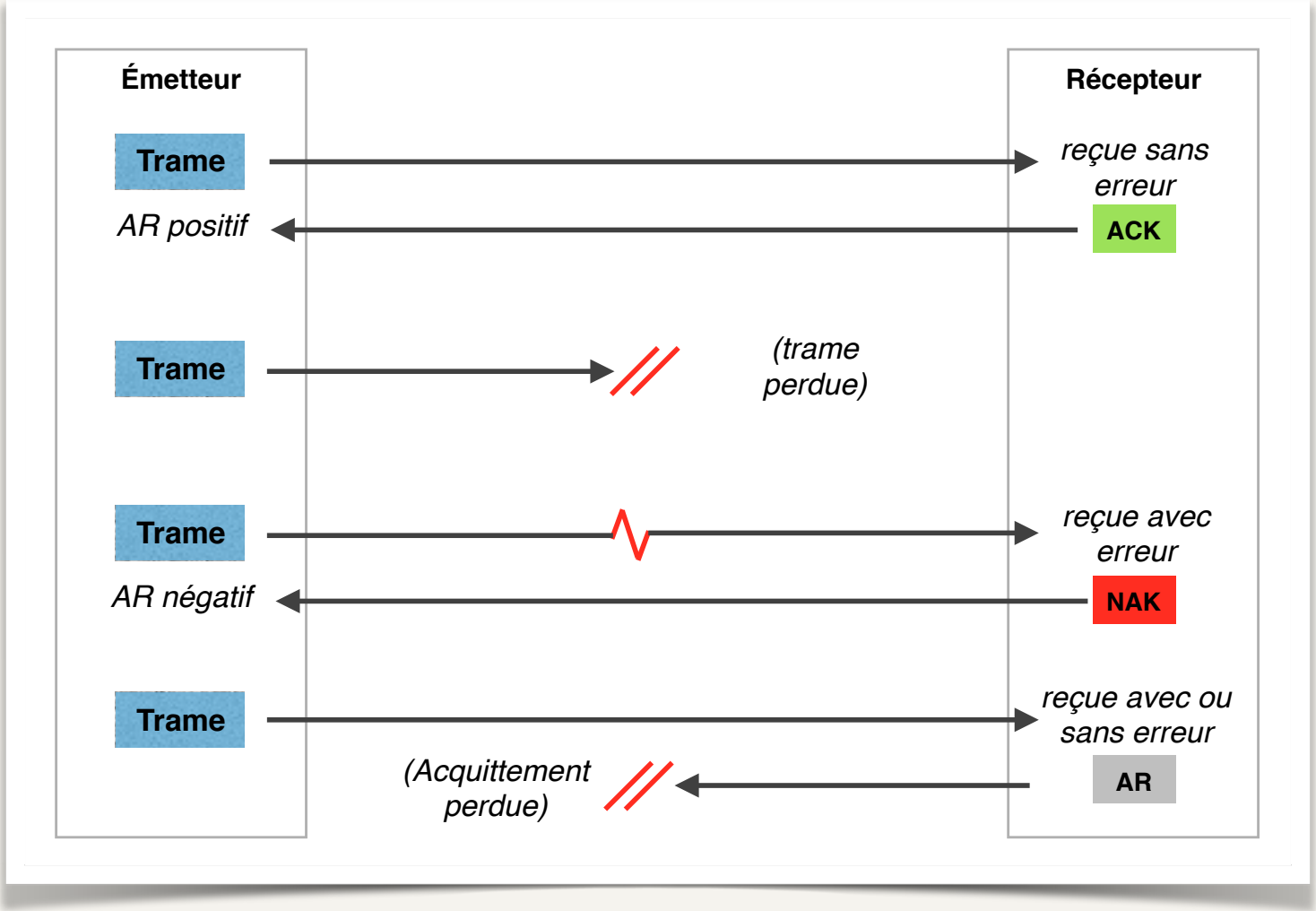


Fig 3.2 - Scénarios pour des transmissions de trames et acquittements

2 - Objectif de la couche liaison de données

Services offerts

Avec le dernier cas, l'émetteur va retransmettre la trame et le récepteur reçoit **deux trames identiques**.

Pour gérer les trames perdues, erronées ou dupliquées, on devra **numéroter les trames**.

La couche Liaison de données **utilise les services de la couche physique**.

- La couche physique transporte des trains de bits
- La couche liaison de données doit reconnaitre des trames parmi ces trains de bits et vérifier les erreurs.

2 - Objectif de la couche liaison de données

Services offerts

Pour **délimiter les trames**, on peut utiliser :

- soit des caractères spéciaux (dans le cas de transmission en **mode caractère**)
  - DLE, STX en début de trame
  - DLE, ETX en fin de trame
  - doublement d'un DLE au sein d'une trame

Début de trame		*Contenu de la trame*					*Fin de trame*	
DLE	STX	'H'	'e'	'l'	'l'	'o'	DLE	ETX

- soit une **violation de codage** sur le support physique, en utilisant une séquence spéciale et invalide pour des données qui correspond à un délimiteur de trame
- soit un système de **fanion** de début et de fin de trame :
  - Ex. avec le **fanion** « **01111110** ».
  - L 'émetteur
    - remplace au sein des trames les séquences « **11111** » par « **111110** » ;
    - ajoute un fanion « **01111110** » en début et en fin de trame.
  - Le récepteur
    - reconnait et retire les fanions « « **01111110** » ;
    - il remplace les séquences « **111110** » par « **11111** ».

3 - Détection des erreurs

Types d'erreur et type de code

Erreur par rafale :
- entre 2 bits erronés, 0 à plusieurs bits sont erronés

Erreur isolée
- 1 bit erroné ; indépendance des erreurs

Type de code
- **Code détecteur** d'erreur :
  - on ajoute juste assez d'information pour **détecter** les erreurs
  - une trame erronée sera retransmise
- **Code correcteur** d'erreur :
  - on ajoute une redondance d'information suffisante pour que le récepteur puisse **restituer les données** originales.
  - Un tel code est utilisé pour des transmission en mode simplex

3 - Détection des erreurs

Distance de Hamming

La distance de Hamming entre deux mots de code N_1 et N_2 est le nombre de bits différents :

- On calcule $N_1 \oplus N_2$
- Le nombre de bits à 1 dans $N_1 \oplus N_2$ est la distance de Hamming

La distance de Hamming d'un code complet est la distance minimale entre 2 mots de codes

Pour détecter E erreurs, le code complet doit avoir une distance de Hamming $D_h = E + 1$

Pour corriger F erreurs, le code complet doit avoir une distance de Hamming $D_h = 2.F + 1$

3 - Détection des erreurs

Code de contrôle de parité

Contrôle de parité paire ; on ajoute **un bit de parité** au bloc de données

- Si le nombre de bits à 1 dans le bloc de données est pair, le code de parité est 0
- Si le nombre de bits à 1 dans le bloc de données est impair, le code de parité est 1
- Le mot de code (données + bit de contrôle) a donc toujours un **nombre de bits à 1 pair**
- Ex.: données **1010001** => mot de code **10100011**

La distance de Hamming du code de contrôle de parité est 2 :

- Toute erreur simple est détectée,
  car $D_h = E + 1$ => $E = D_h - 1 = 1$

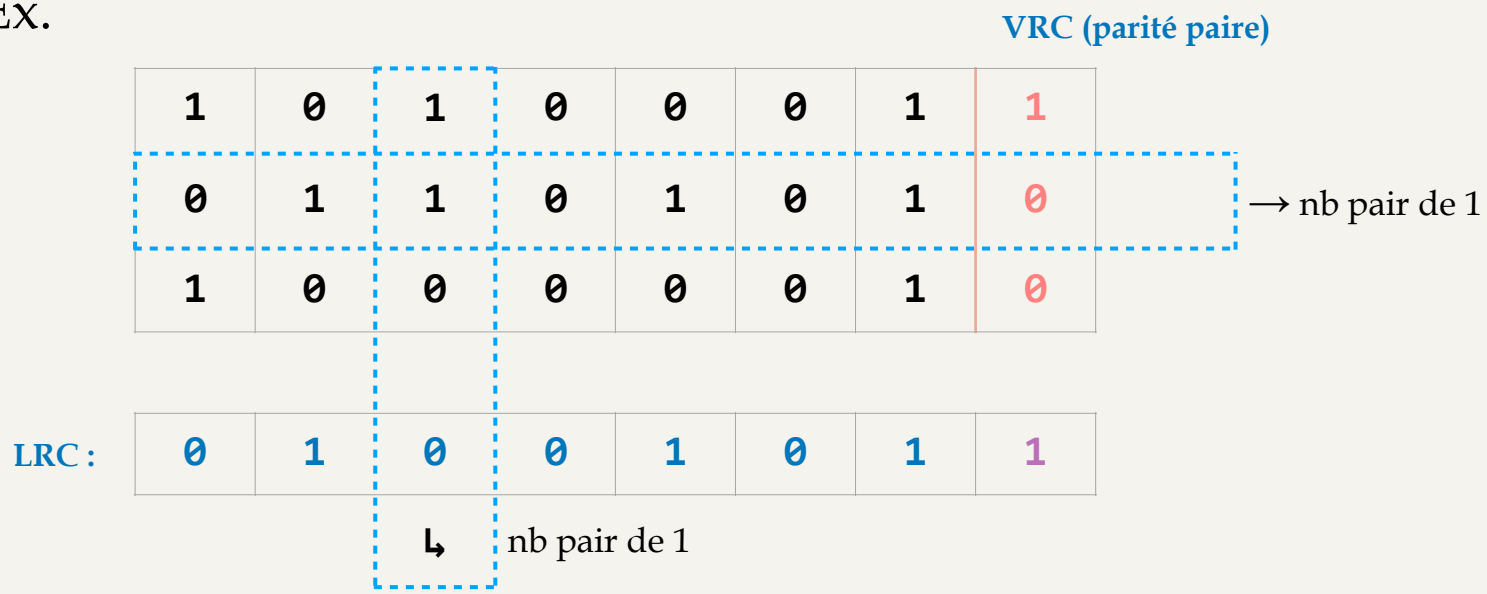
3 - Détection des erreurs

Code de contrôle de parité

On distingue

- des codes de parité verticale, VRC (*Vertical Redundancy Check*),
- des codes parité horizontale, LRC (*Longitudinal Redundancy Check*),
- des codes de parité croisée. Ces derniers permettent la corrections d'erreurs simples.

- Ex.



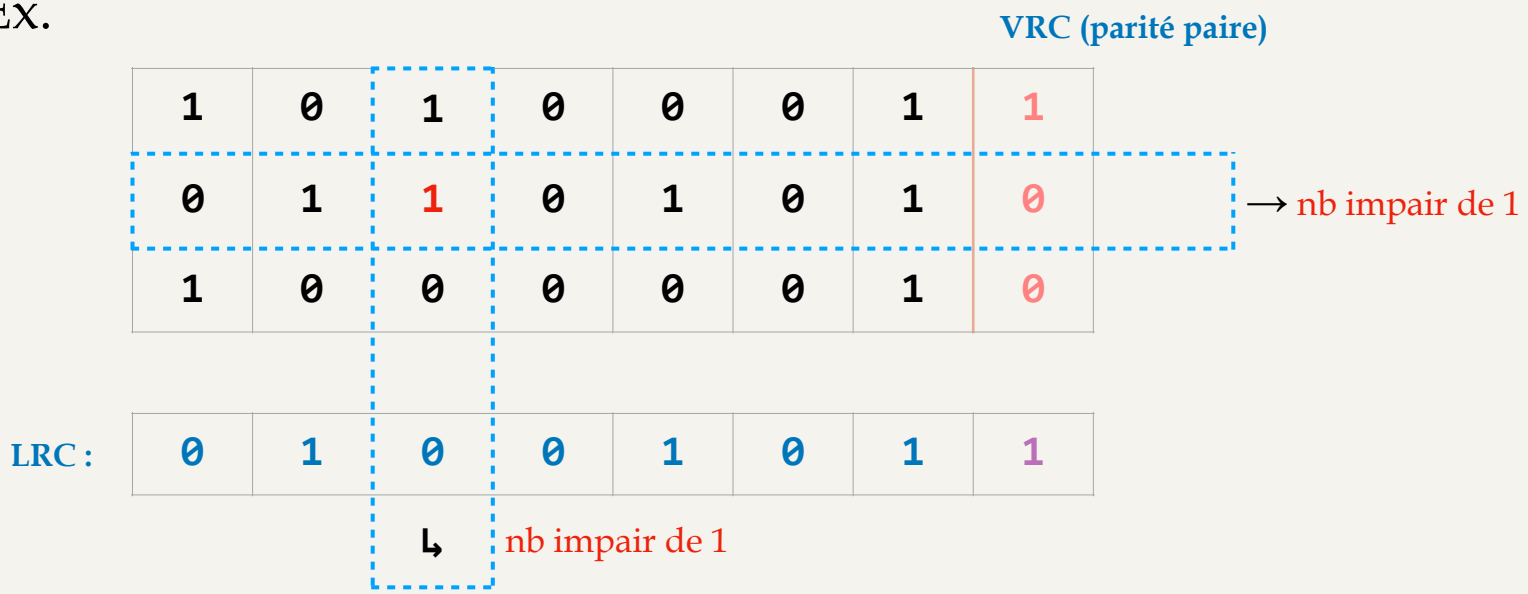
3 - Détection des erreurs

Code de contrôle de parité

On distingue

- des codes de parité verticale, VRC (*Vertical Redundancy Check*),
- des codes parité horizontale, LRC (*Longitudinal Redundancy Check*),
- des codes de parité croisée. Ces derniers permettent la corrections d'erreurs simples.

- Ex.



3 - Détection des erreurs

CRC : Code de redondance cyclique, ou code polynomial

C'est un code classique de **détection** d'erreur.

- On applique une **arithmétique polynomiale modulo 2**
  - L'addition comme la soustraction reviennent à un OU exclusif entre les opérandes
  - La division est réalisée via des soustractions modulo 2
  - Les calculs peuvent aussi se faire à l'aide de polynômes
- Émetteur et récepteur utilisent le même **code générateur G** de g bits
- **M** est le mot de code à transmettre vers le récepteur ; l'émetteur va concaténer à **M** un mot de contrôle **R** de r bits, avec r = g - 1. Le résultat **M•R = T** sera transmis au récepteur qui considèrera **M** comme correct si le reste de la division de **T** par **G** est nul.
  - **G = 10011**
  - **M = 1101011011**
    R = 1110
  - **T = 11010110111110**

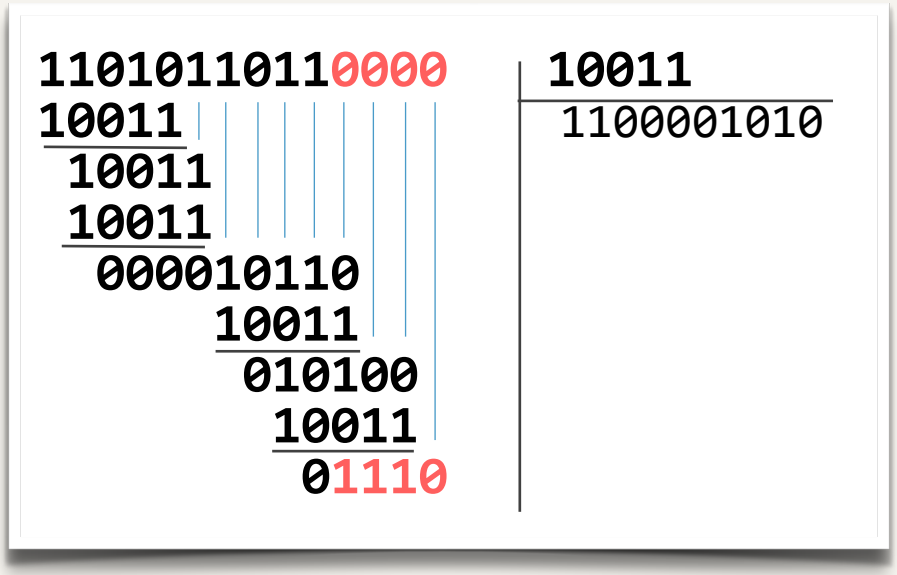


Fig 3.3 - Division pour le calcul du CRC

Voir l'annexe https://utc505.seancetenante.com/documents/CRC-Code-de-redondance-cyclique.pdf

4 - La sous-couche MAC

Définitions

MAC (*Media Access Control*) est la sous-couche inférieure de la liaison de données

- elle gère l'accès au support physique
- elle règle les problèmes d'adressage (adresses MAC, de 6 octets)
- elle contrôle les erreurs, via un CRC, le FCS (*Frame Check Sequence*)

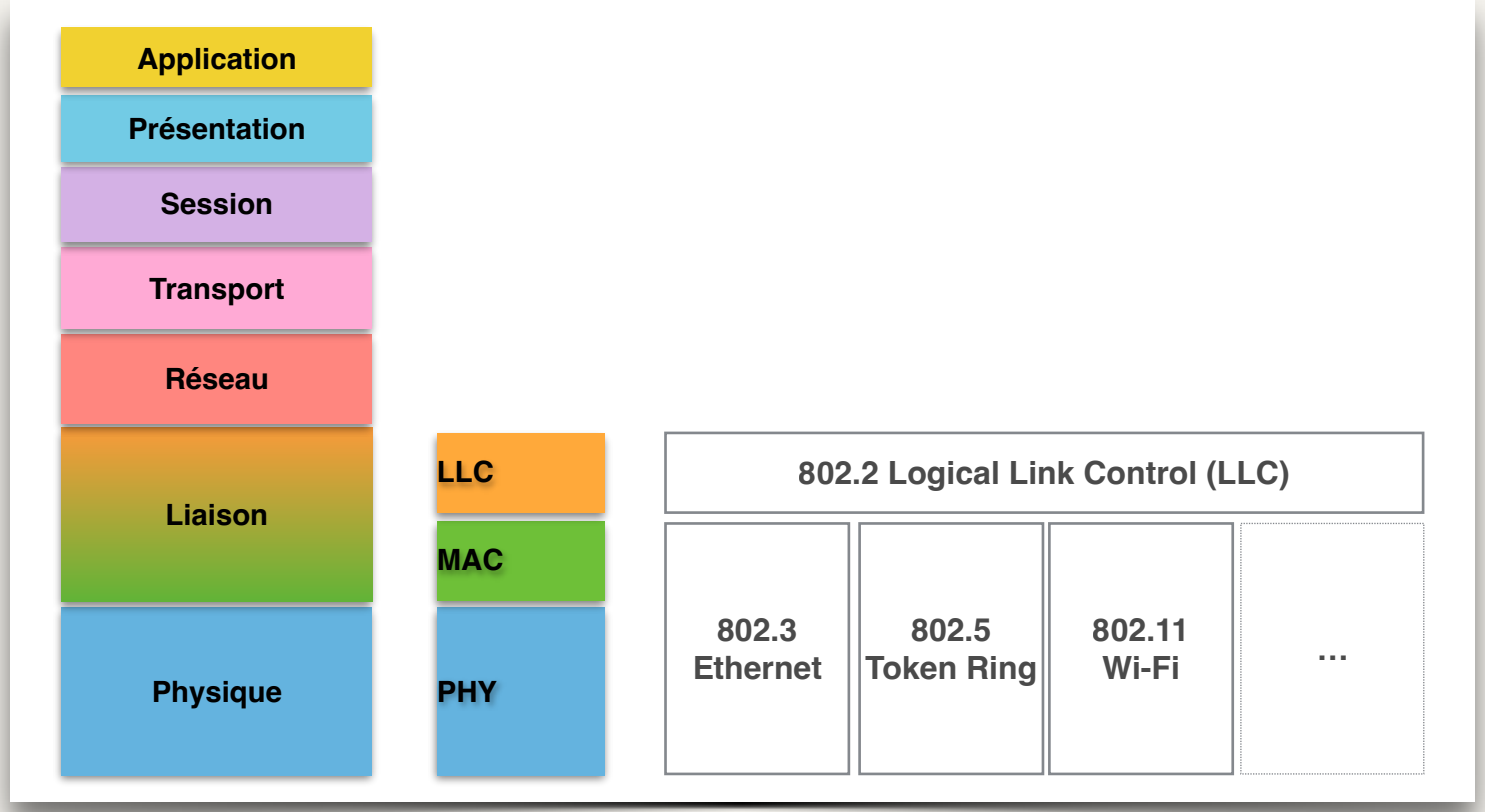


Fig 3.5 - Couches PHY, MAC et LLC

4 - La sous-couche MAC

Définitions

On distingue différentes méthodes d'accès au canal d'un réseau local :

- Les méthodes aléatoires, ou **à contention**
  - **CSMA** (*Carrier Sense Multiple Access*) = Écoute de porteuse avec accès multiple
    - CSMA/CA (*Collision Avoidance*) = **à prévention** de collision
    - CSMA/CD (*Collision Detection*) = **à détection** de collision
- Les méthodes à réservation, ou **à jeton**
  - un jeton (*token*) est une trame qui circule sur le réseau. Une station qui veut émettre doit attendre le jeton, libre, pour le remplacer par sa trame. Lorsque sa trame revient, il la remplace par le jeton.
  - Illustration animée
- Les méthodes à partage de canal, qui exploitent les techniques de multiplexage
  - TDMA (*Time Division Multiple Access*) (Voir Illustration animée)
  - FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)
  - CDMA (*Code Division Multiple Access*)

L'adressage MAC

L'adresse MAC désigne une interface réseau d'un équipement d'une manière unique

Elle est gravée par le fabriquant sur l'adaptateur réseau, NIC (*Network Interface Card*)

Le format universel IEEE nommé MAC-48 ou EUI-48 se compose de 48 bits :

- OUI (*Organizationally Unique Identifier*) : 3 octets
- SN (*Serial Number*) : 3 octets pour un numéro de série unique donné par le fabriquant
- On exprime en général une adresse MAC avec 6 octets notés en hexadécimal, séparés par « : »

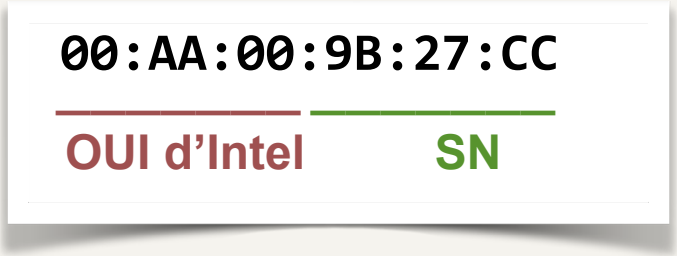


Fig 3.6 - Adresse MAC

- Un broadcast est réalisé avec `FF:FF:FF:FF:FF:FF`
- L'IEEE a défini un autre format d'adresse de 64 bits appelé EUI-64

4 - La sous-couche MAC

CSMA/CD

Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection

- ***Carrier Sense*** : écoute de la porteuse (pour vérifier que le support est libre avant d'émettre et pour détecter les colisions)
- ***Multiple Access*** : Accès multiple à un canal unique
- ***Collision Detection*** : détection de collision

Une collision est un **mélange de signaux**

- Elle est détectée par les stations émettrices car elles maintiennent l'écoute du canal pendant l'émission d'une trame
- Quand une station détecte une collision, elle émet une séquence nommée « *JAM signal* », (un signal de brouillage), afin que toutes les stations concernées détectent la collision
- Deux trames victimes de collision devront être retransmises par leur station d'origine

CSMA/CD est utilisé dans des réseaux à diffusion de type Ethernet.

4 - La sous-couche MAC

CSMA/CD

Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection

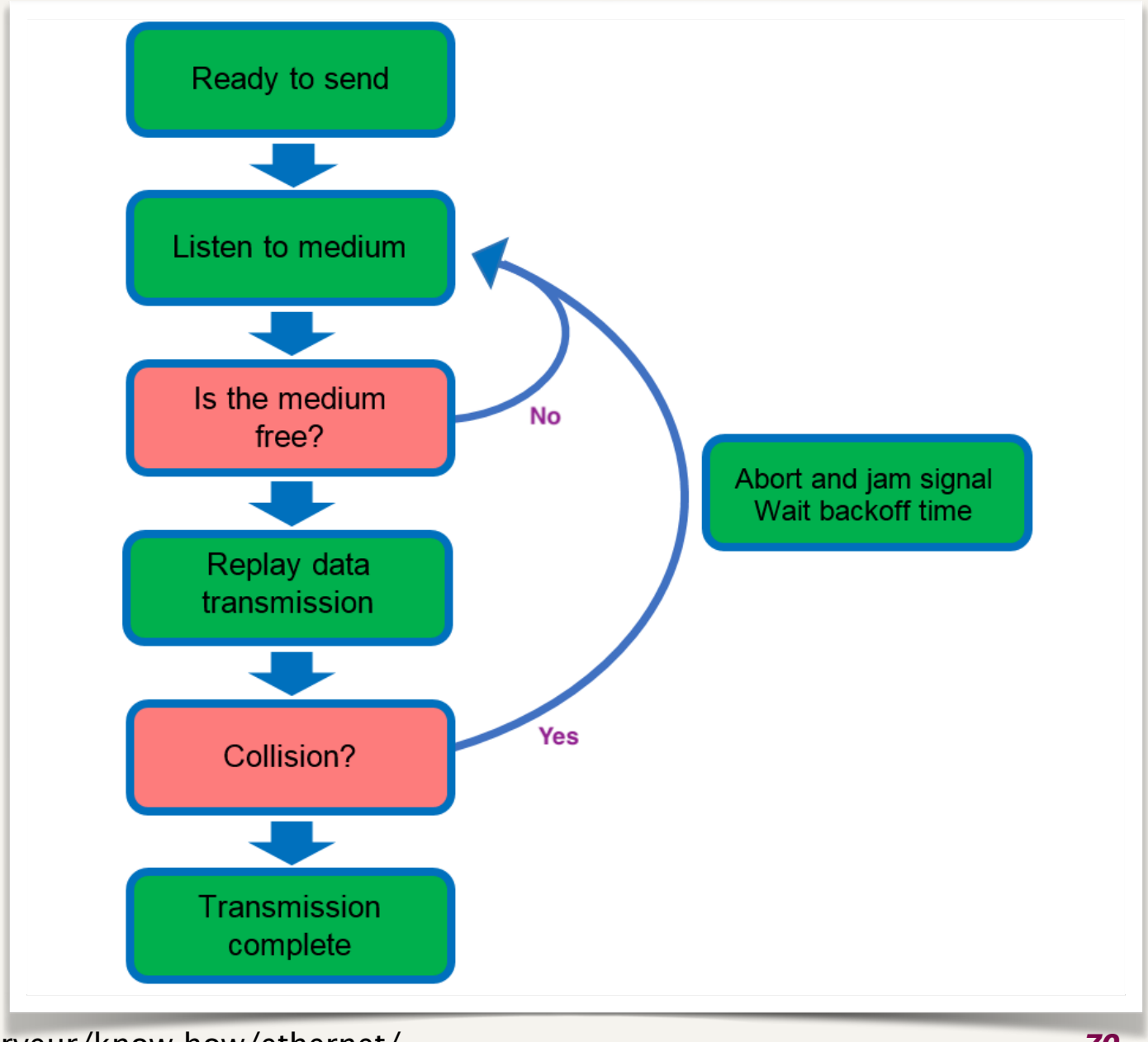


Fig 3.7 - Principe du CSMA/CD
https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/ethernet/

4 - La sous-couche MAC

CSMA/CD

Réseau à diffusion : une trame émise est diffusée à **toutes les stations**

1. Avant d'émettre, la station **écoute le canal**
2. Si le canal est libre :
   - alors commencer l'émission de la trame et **maintenir l'écoute**
   - sinon => *aller en (5)*
3. Pendant l'émission, **si une collision est détectée** :
   Alors :
   - on arrête alors immédiatement l'émission de la trame
   - et on transmet le « *JAM signal* » afin que toutes les stations détectent la collision
   - On attend pendant une durée aléatoire => *aller en (1)*
4. **Sinon** : fin de transmission réussi => avis à la couche supérieure
5. Le canal est occupé => attendre que le canal soit libre
6. Le canal devient libre => attendre une durée aléatoire ; si nombre max. d'essais de transmission non dépassé, *aller en (2)*
7. Le nombre max. d'essais de transmission est dépassé => avis d'échec à la couche supérieure

CSMA/CD

La phase (6) est une phase de **contention**

Des collisions surviennent car deux stations peuvent être en phase (2)

La fenêtre de collision est le temps minimal d'émission pour qu'une collision soit détectée

- Elle vaut deux fois le temps de propagation d'une trame sur la plus grande distance
- Voir l'illustration animée

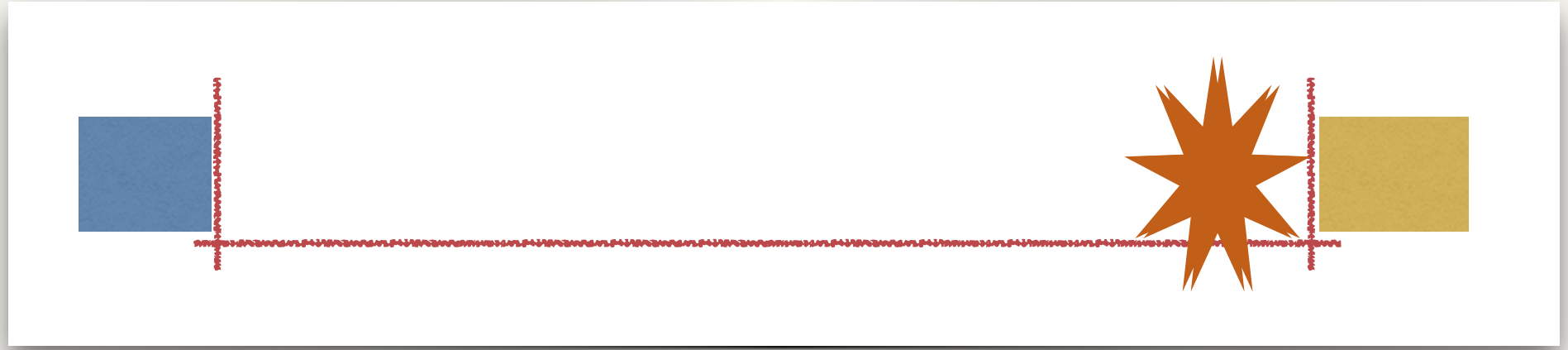


Fig 3.8 - Fenêtre de collision

CSMA/CD

La phase (6) est une phase de **contention**

Des collisions surviennent car deux stations peuvent être en phase (2)

La fenêtre de collision est le temps minimal d'émission pour qu'une collision soit détectée

- Elle vaut deux fois le temps de propagation d'une trame sur la plus grande distance
- Voir l'illustration animée

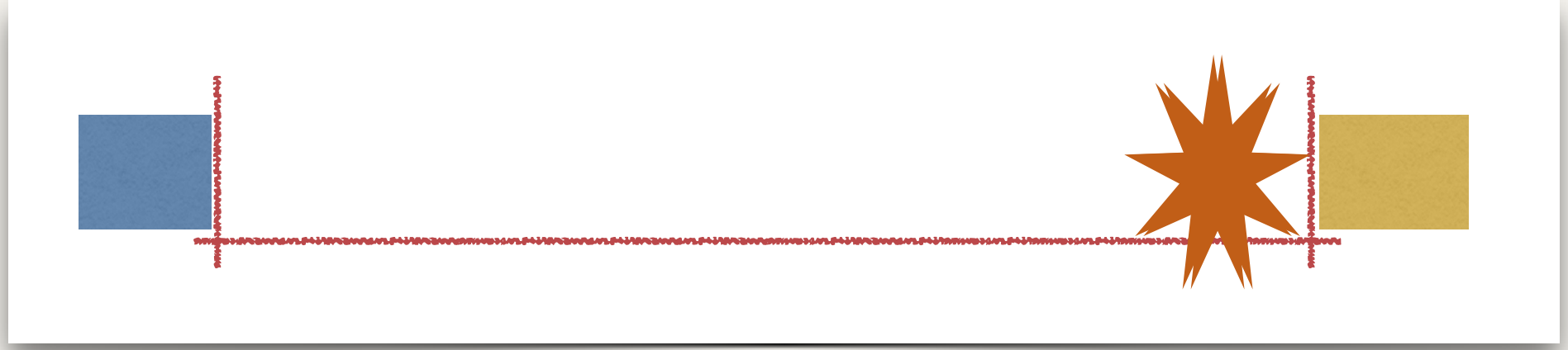


Fig 3.8 - Fenêtre de collision

4 - La sous-couche MAC

Protocole de LAN sans fil

Réseau à diffusion nécessitant des protocoles adaptés

Problème de la **station cachée**

- A et C souhaitent communiquer avec B
- A émet. C est hors de portée de A. Si C émet aussi, des interférences se produisent pour B

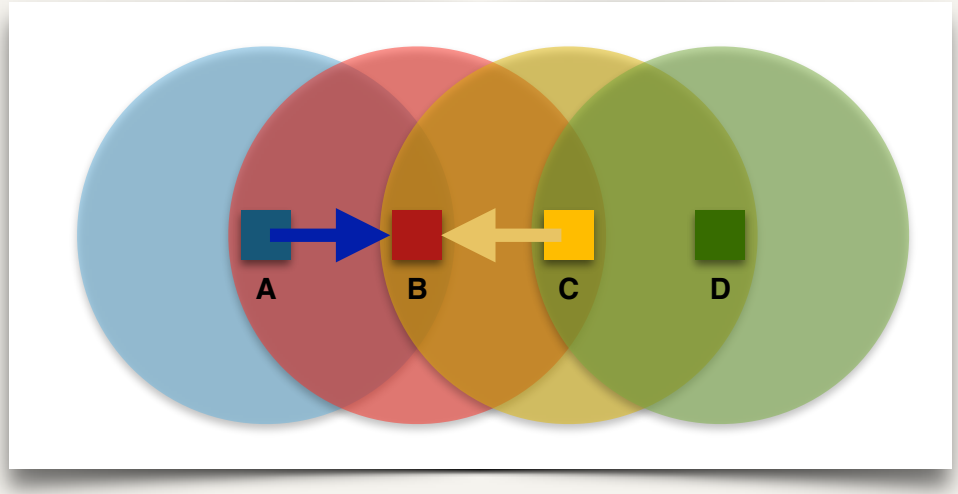


Fig 3.9 - problèmes de la station cachée

Protocole de LAN sans fil

MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*) est un exemple de protocole

- Lorsque la station B veut envoyer une trame T vers C,
  - elle envoie d'abord une mini trame RTS (*Request to Send*) = « demande d'émission », indiquant la longueur de la trame T qui va suivre
  - C répond à B avec CTS (*Clear to Send*) = « prêt à l'émission », encore avec la longueur de la trame T
  - Quand B reçoit CTS de C, elle commence à émettre T
- Les stations à portée de B reçoivent RTS ; celles qui ne reçoivent pas CTS peuvent émettre à leur tour.
- Les stations à portée de C reçoivent CTS et elles reportent toute transmission éventuelle le temps de la transmission de T de B vers C

IEEE 802.11 (Wi-Fi) utilise une variante de MACA nommée **CSMA/CA** (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*)

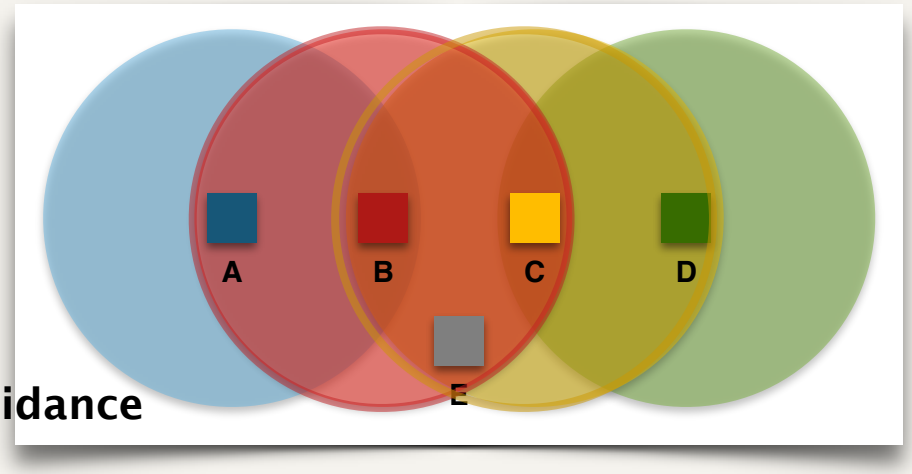


Fig 3.10 - Multiple Access with Collision Avoidance

Les normes IEEE 802

Les réseaux locaux sont normalisés par l'IEEE (*Institute of Electrical & Electronics Engineers*) via des groupes de travail du comité 802.

Les plus connus sont :

- 802.1 Vue d'ensemble, définitions, architectures des LAN
- 802.2 LLC (Logical Link Control)
- **802.3 Ethernet**
- 802.5 Token-Ring
- **802.11 LAN sans fil (Wi-Fi)**
- 802.15 Réseaux personnels sans fil (Bluetooth)
- 802.16 MAN sans fil (WiMax)

ISO (*International Organization for Standardization*) normalise à son tour certain standards IEEE

4 - La sous-couche MAC

IEEE 802.3 et les réseaux Ethernet

Ethernet commence avec les travaux de **Bob Metcalfe** au Xerox PARC, dans les années 1970

- Normes IEEE 802.3 en 1983
- Années 1990 :
  - Ethernet supplante Token Ring et FDDI
  - Ethernet sur paires torsadées et sur fibre optique
  - Ethernet partagé et **commuté ;** 10BaseT
  - Fast Ethernet (100Base-TX…)
  - Gigabit Ethernet (1000Base-T…)
- Actuellement :
  - **Ethernet commuté** a remplacé l'Ethernet partagé
  - IEEE 802.3an - 10GBase-T et IEEE 802.3ae - 10GBase-F
  - IEEE 802.3bs - 400 Gigabit Ethernet et 200 Gigabit Ethernet (2017)

Fig 3.11 - Bob Metcalfe

4 - La sous-couche MAC

IEEE 802.3 et les réseaux Ethernet

Les premières versions d'Ethernet comme 10Base5 ou 10Base2 utilisaient des **câbles coaxiaux**

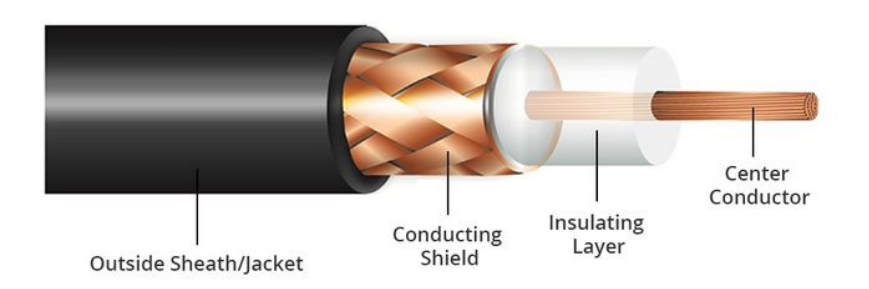


Fig 3.12 - Câble coaxial

Ethernet a beaucoup évolué avec l'utilisation de la **paire torsadée**

Chaque évolution reste compatible avec les normes précédentes et avec la **méthode d'accès CSMA/CD**

Fig 3.13 - Câble à paires torsadées

- **10BaseT**
  - 10 Mbit/s, codage en bande de base (Manchester)
  - T => **Twisted pair** ; une paire pour l 'émission, une pour la réception
  - Topologie en étoile autour d'un **concentrateur** (*hub*)
  - Liaison point à point entre station et hub ; 100 m maximum
  - Connecteur **RJ45**
  - 3 niveaux de hubs maximum

4 - La sous-couche MAC

IEEE 802.3 et les réseaux Ethernet

- **Fast Ethernet** à 100 Mbit/s
  - Norme 802.3u adopté en 1995 ; variantes 100Base-T4, **100Base-TX**, 100Base-FX
  - Remplacement progressif des concentrateurs (*hub*) par des **commutateurs** (*switch*) => un seul domaine de collision par port de switch

- **Gigabit Ethernet**
  - Ratifiée par IEEE, comité 802.3ab, en 1999
  - 1000Base-T utilise en full duplex 4 paires torsadées d'un câble FTP de catégorie 5e ou supérieure, 100 m maximum
    - Compatible avec 100Base-TX et 10Base-T
  - 1000Base-SX : 1 Gbit/s sur fibre optique multimodes à 850 nm
  - 1000Base-LX : fibre optique monomodes et multimodes à 1300 nm

4 - La sous-couche MAC

IEEE 802.3 et les réseaux Ethernet

- **10 Gigabit Ethernet**
  - Normes en 2002 et 2004 pour la **fibre optique** et câbles blindés en cuivre
  - Normes IEEE 802.3ae ou 10GBase-F
    - 7 variantes publiées depuis 2002
    - Fibres multimode et monomode ; Longueurs d'onde 850, 1310 et 1550 nm ; réseaux LAN, MAN, WAN
  - Normes IEEE 802.3an ratifiées en 2006 pour le câble à paires torsadées
    - Câble catégorie 6e, 6a ou 7, en full duplex sur 4 paires
    - 100 m maximum

- **IEEE 802.3ba**
  - Travaux depuis 2007 sur Ethernet à **40 et 100 Gbit/s**
  - Approuvés par l'IEEE en juin 2010
  - Débits jusqu'à 100 Gbit/s :
    - fibre optique monomode, max. 40 km
    - fibre optique multimode, max. 150 m avec OM4, 100 m avec OM3
    - paires torsadées : max. 7 m

4 - La sous-couche MAC

Le protocole MAC IEEE 802.3

Le format de la trame Ethernet (exemple de la trame Ethernet V2)

- Adresses MAC destination (unicast, multicast ou broadcast)
- Adresses MAC source
- Type : pour indiquer au récepteur le protocole lié aux données.
  Ex. 0x0600 : Xerox Network Systems ; 0x0800 : IP ; 0x8100 : 802.1q (encapsulation vlan) ; 0x0806 : ARP (Address Resolution Protocol)
- Pad : 0 à 46 octets de bourrage à 0 afin que la trame fasse au min. 64 octets
- FCS : Frame Check Sequence de type CRC
  $G(x) = x^{32}+x^{26}+x^{23}+x^{22}+x^{16}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+x^8+x^7+x^5+x^4+x^2+x+1$

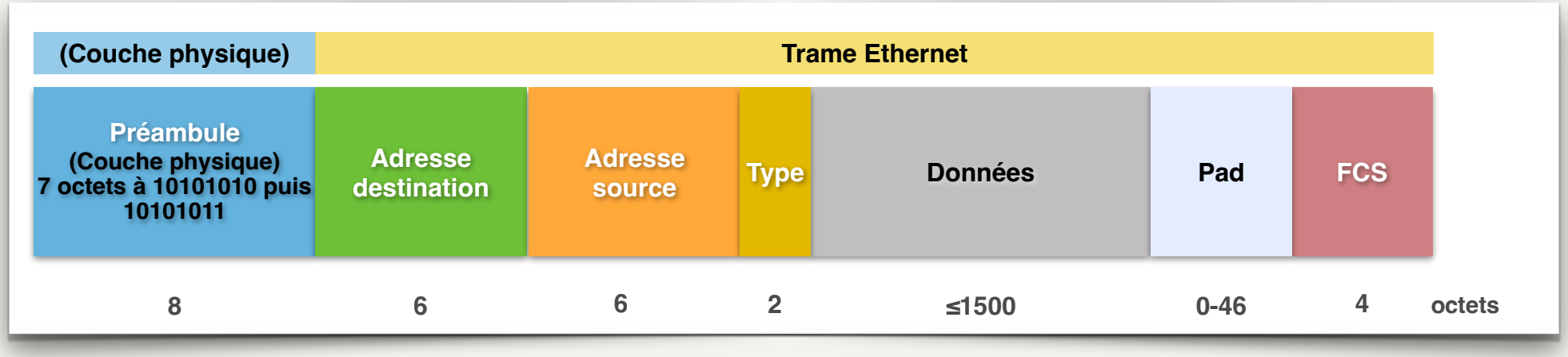


Fig 3.14 - Trame Ethernet V2

Wi-Fi et les normes IEEE 802.11

Les WLAN (*Wireless LAN*) sont très répandus

Ils coexistent avec d'autres technologies sans fil :

- **BlueTooth** (Dent bleu, celle d'un roi Danois, Harald 1er)
  - Développé en 1994 par Ericsson puis standardisé IEEE 802.15.1
  - Utilise une bande de fréquence autour de 2,4 GHz
  - 1 Mbit/s, portée 20 m env.
  - WPAN ; connectique sans fil

- **Réseaux cellulaires** 3G, 4G et 5G
  - UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*
  - LTE, *Long Term Evolution*

Wi-Fi et les normes IEEE 802.11

Les normes IEEE 802.11 - couche PHY

- 802.11b (en 1999) et 802.11g (2003)
- **802.11n** ratifié en 2009
  - Bande à 2,4 GHz ou 5 GHz
  - 200 à 450 Mbit/s
  - portée 50 à 125 m
  - Technologie MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) qui exploite plusieurs antennes
  - regroupement de canaux radio
- **802.11ac** ratifié en 2014
  - Bande à 5 GHz ; env. 20 canaux de 20 Mhz
  - 433 à 1300 Mbit/s (avec 4 canaux agrégés)
  - portée 30 à 125 m
  - MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) (jusqu'à 8 antennes)
  - regroupement de canaux radio
- **802.11ax** ratifié en 2021
  - Bande de 1 à 7,1 GHz ; env. 20 canaux de 20 Mhz
  - 1 à 10 Gbit/s (avec 8 canaux agrégés) ; portée 30 à 125 m
  - MIMO et regroupement de canaux radio : comme 802.11ac
- **802.11be** (Extremely High Throughput : EHT) alias **Wi-Fi 7** prévu fin 2024.

4 - La sous-couche MAC

Wi-Fi et les normes IEEE 802.11

Les normes IEEE 802.11 - couche MAC :

- 802.11e - Ajoute des mécanismes de **QoS** dans les réseaux 802.11
- 802.11i - WPA2 (*Wi-Fi Protected Access*). Mécanismes d'identification et de chiffrement des données (WPA), afin de remplacer l'algorithme initial WEP de la norme 802.11 qui est obsolète
- 802.11h - Conformité aux règlementations européennes

La protection d'un réseau Wi-Fi :

- Un réseau Wi-Fi n'est jamais sûr.
- Les clés WPA et WPA2 ne sont pas inviolables
- En 2018, **WPA3** est standardisé par le consortium Wi-Fi Alliance
- Les box et bornes d'accès Wi-Fi permettent de configurer et surveiller le réseau. On peut ainsi :
  - Savoir qui est connecté ? Adresses IP et MAC des machines connectées
  - Utiliser une clé WPA forte
  - Filtrer les adresses MAC
  - Désactiver DHCP ;
  - Ne pas diffuser le **nom du réseau**, alias **SSID** (*Service Set Identifier*)

5 - Pont et commutateur

Pont

Un pont (*bridge*) est une passerelle agissant en couche liaison de données

Il peut permettre d'interconnecter des LAN
- distants
- de protocoles MAC distincts (si l'adaptation peut se faire au niveau 2)

Les principaux protocoles de pont sont :
- *Spanning Tree Protocol* (algorithme de l'arbre recouvrant) permettant de déterminer une topologie réseau sans boucle (appelée arbre) dans les LAN avec ponts. Il est défini dans la norme IEEE 802.1D
- *Shortest Path Bridging*, spécifié par la norme IEEE 802.1aq, est une technologie pour simplifier la création et la configuration des réseaux, tout en permettant un routage à trajets multiple.

5 - Pont et commutateur

Commutateur Ethernet

Un commutateur Ethernet (*Ethernet switch*) est un **pont multiport**, agissant au niveau 2 du modèle OSI

Le commutateur analyse les trames arrivant sur ses ports d'entrée et filtre les données afin de les aiguiller uniquement sur les ports adéquats (on parle de commutation ou de réseaux commutés)

La commutation est réalisée suivant deux techniques :

- ***Store & Forward*** : la trame est stockée, vérifiée puis retransmise sur un port de sortie
- ***Cut Through*** ou ***Fast Forward*** : le commutateur commence l'envoi de la trame sur un port de sortie dès la lecture de l'adresse destination de la trame

La table de commutation est construite par **apprentissage**

- Lorsqu'une trame est reçue sur un port P, le commutateur examine l'adresse source et met à jour l'entrée (adresse S ; port P) de la table de commutation
- Si la destination est inconnue, on opère par inondation : la trame est transmise vers tous les ports (sauf P)
- Si la destination est connue, la trame est commutée vers le bon port

5 - Pont et commutateur

VLAN ; Virtuel Local Area Network

Les VLAN, *Virtual Local Area Networks*, permettent de segmenter les réseaux physiques en sous-réseaux logiques.

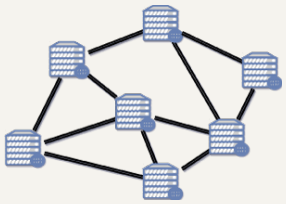
Un VLAN, réseau local virtuel, permet de regrouper des appareils indépendamment de leur emplacement physique. C'est donc un sous-réseau logique créé à l'intérieur d'un réseau physique.

Fonctionnement :

- Les VLAN sont configurés sur des **commutateurs**, où les ports sont assignés à différents VLAN.
- La communication entre appareils d'un même VLAN est directe, tandis que le trafic entre VLAN nécessite un routeur.

Avantages :

- **Sécurité** : Limite l'accès aux données sensibles à des groupes spécifiques.
- **Performance** : Réduit le trafic de diffusion et optimise l'utilisation du réseau.
- **Flexibilité** : Facilite la gestion et l'organisation des ressources réseau.



1 - Préambule

Contenu du chapitre

- *Croisements et Destination*
  - Adressage, tables de routage et l'expédition de données dans le réseau IP. Évolution de IPv4 à IPv6.

1 - Objectif de la couche réseau

Objectifs

Couche réseau - Niveau paquet - *Network layer*

- **Acheminer** des paquets de la source jusqu'à la destination
- **Choisir les chemins** appropriés à travers le sous-réseau. Ces chemins passent par des **routeurs**
- Permettre le passage de paquets d'un réseau à un autre
- Gestion du sous-réseau de transport

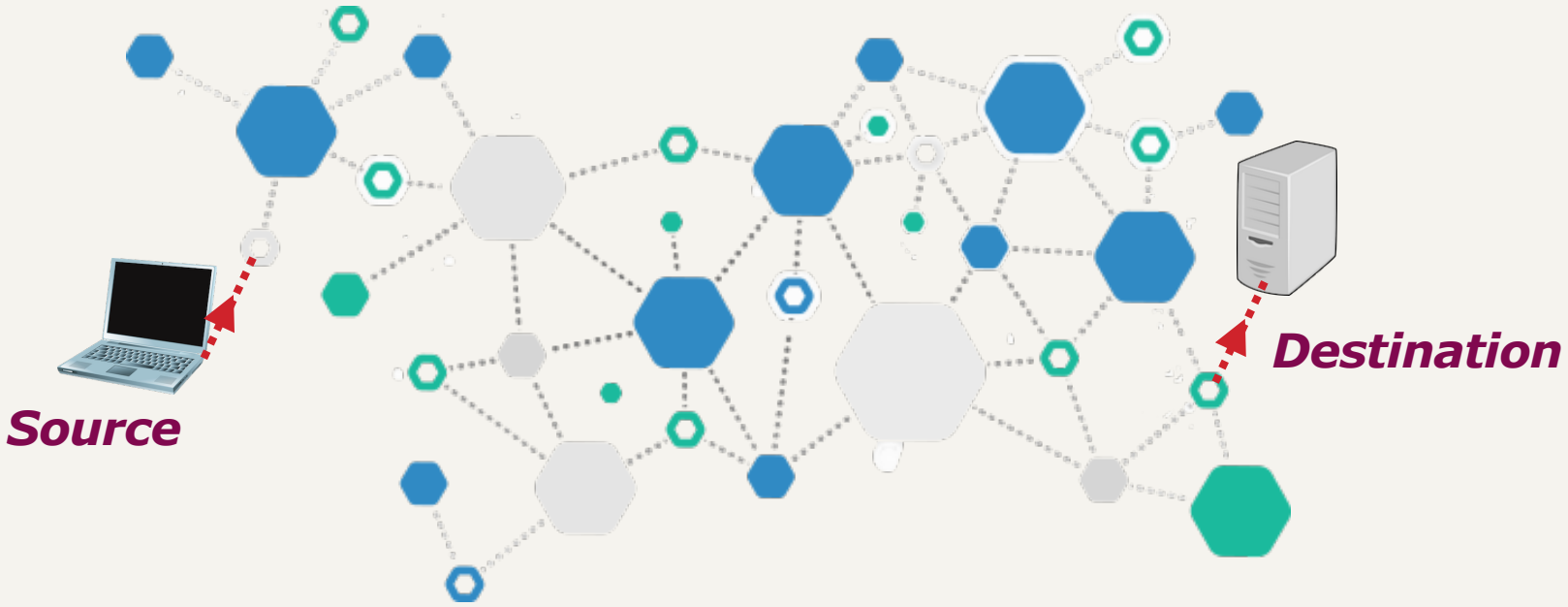


Fig 4.1 - Réseau maillé

1 - Objectif de la couche réseau

Services de la couche réseau

Ils sont fournis à la couche transport

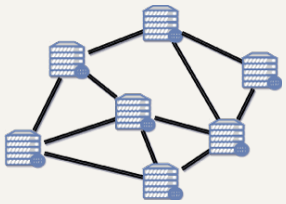
Couche transport	***Client (utilisateur)***
----------	***----------***
Couche réseau	***Opérateur réseau (transporteur)***

Fig 4.2 - Service de la couche réseau

Types de service :

	Mode	
	non connecté	connecté
non fiable	*Mode datagramme* **1**	~~2~~
fiable	~~3~~	*Circuit virtuel* **4**

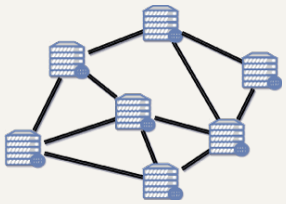
Fig 4.3 - Types de service



1 - Objectif de la couche réseau

Services de la couche réseau

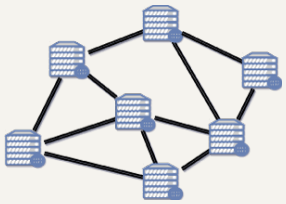
Service non fiable en mode sans connexion		Service fiable orienté connexion
Mode datagramme		**Circuit virtuel**
Service postal	*Analogie*	Service téléphonique
En couche transport (sur les machines d'extrémité)	*Complexité*	en couche réseau (au sein du sous-réseau)
Couche Internet	*Exemple*	ATM ; Relai de trame ; MPLS
Aucune route n'est choisie à l'avance	*Organisation*	La route est choisie à la connexion et mémorisé. Elle est utilisée pour tout le trafic lié à cette connexion



1 - Objectif de la couche réseau

Services de la couche réseau

Service non fiable en mode sans connexion		Service fiable orienté connexion
Mode datagramme		**Circuit virtuel**
Chaque datagramme contient l'adresse de destination et est acheminé indépendamment des autres	*Organisation*	Le CV disparait à la libération de la connexion
Chaque routeur maintient une table de routage (@destination ; ligne de sortie)	*Routage*	Chaque routeur maintient une table de routage (n° CV ; ligne de sortie)
Adaptatif aux défaillances et congestions	*Tolérance aux pannes*	La défaillance d'une route => celle du CV entier
Temps d'analyse des paquets important	*Efficacité*	Analyse des paquets très rapide



2 - Algorithme de routage

Définitions ; introduction

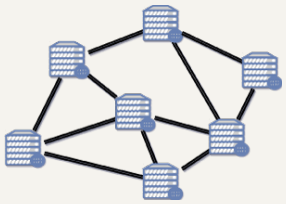
Chemin : suite de liens et de nœuds intermédiaires parcourus pour aller de la source à la destination dans le réseau

Un **algorithme de routage** est la partie du logiciel de réseau responsable du **choix d'une ligne de sortie** d'un routeur en fonction de la destination d'un paquet entrant

À cette fin, chaque routeur gère **une table de routage**

On distingue :

- Des algorithmes non adaptatifs
  - Le routage est **statique**
  - Les routes sont calculées à l'avance
  - Cf. commande **route** des systèmes Unix et Linux
- Des algorithmes adaptatifs
  - Le routage est **dynamique**
  - Les décisions de routage sont modifiées en fonction de changements (trafic, topologie, etc.)



Définitions ; introduction

La **métrique** utilisée est une fonction de :

- La distance géographique
- Le nombre de sauts
- Le temps d'acheminement (temps de transit + délais d'attente dans les routeurs)
- Le coût de transport
- …
- Ou bien une **fonction pondérée** de variables ci-dessus

La **table de routage** est utilisée pour la fonction de **relayage** de paquets

- Pour **acheminer** le paquet vers le prochain saut
- FIB, *Forwarding Information Base*, table d'information d'acheminement

RIB, *Routing Information Base*, table de routage :

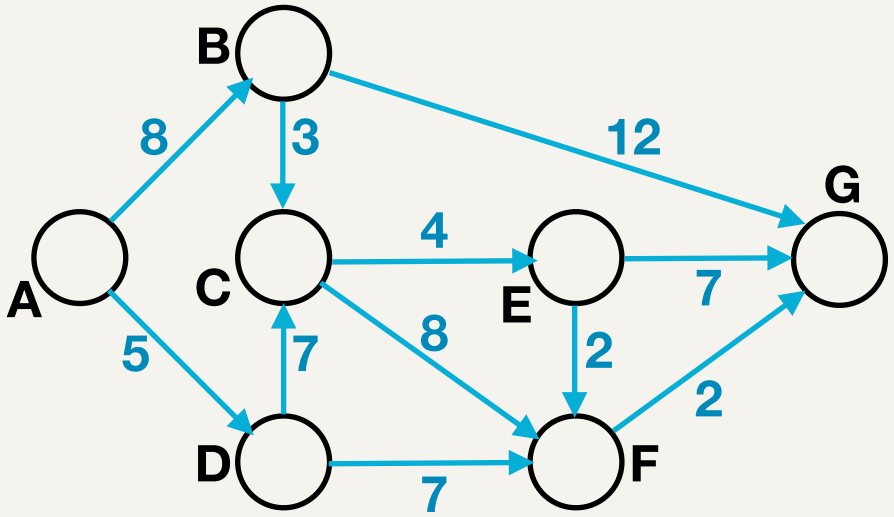
- Permet de **calculer** et de choisir les chemins
- RIB est mis à jour par l'algorithme de routage

Voir : https://www.youtube.com/watch?v=EPo7QyB7Yss

Exemples de routage

Routage du plus court chemin - *Shortest Path Routing*

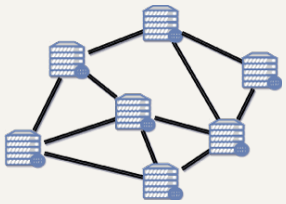
- Algorithme de **Dijkstra**
- Voir https://licence-math.univ-lyon1.fr/lib/exe/fetch.php?media=gla:dijkstra.pdf
- Exercice :
- Voir https://utc505.seancetenante.com/documents/Exercices-UTC505-algorithme-de-Dijkstra.docx
  - Calculer le plus court chemin entre A et G.
    - Par quels nœuds passe ce chemin ? Quel coût a ce chemin entre A et G ?



Exemples de routage

Routage à vecteur de distance - *Distance Vector Routing*

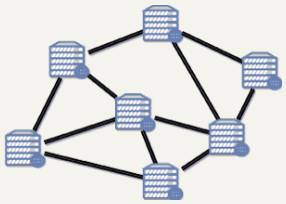
- Ce routage dynamique a été utilisé dans **Arpanet**
- Il reste utilisé avec **RIP** (*Routing Information Protocol*)
- Un vecteur de distance est, pour un routeur R et une destination N connue :
  - $V_{RN} = [\ d_{RN}\ ,\ L_{RN}\ ]$
    avec d_{RN} : meilleure distance connue et L_{RN} : la ligne pour atteindre N
- Chaque routeur R du réseau maintient sa table de routage :
  - $[\ N\ ,\ V_{RN}\ ]$
    soit $[\ N\ ,\ d_{RN}\ ,\ L_{RN}\ ]$
  - et la diffuse aux routeurs voisins
- Chaque nœud R :
  - Apprend ainsi ce que chaque voisin V peut atteindre
  - Met à jour sa propre table :
    - Ajout d'une entrée si le voisin indique une nouvelle destination
    - Calcul et comparaison pour les destinations connues
    - Si $d_{RN} > d_{VN} + d_{RV}$ alors l'entrée $[\ N\ ,\ d_{RN}\ ,\ L_{RN}\ ]$ est remplacé par $[\ N\ ,\ d_{VN} + d_{RV}\ ,\ L_{RV}\ ]$



Exemples de routage

- Voir www.youtube.com/watch?v=kzablGaqUXM

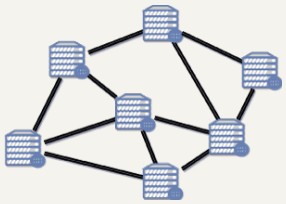
- Ce routage à vecteur de distance doit être amélioré pour assurer une convergence plus rapide et pour éviter la création de boucle dans le réseau.
- On utilise pour cela la technique de l'horizon coupé (*Split Horizon*)



Exemples de routage

Routage par information d'état de liens - *Link State Routing*

- Chaque routeur R doit :
  - Découvrir ses voisins ; un voisin V => un lien R->V
  - Déterminer la distance de chaque voisin : d_{RV}
  - Construire un paquet d'**information d'état de lien** [R , V , d_{RV}]
  - À chaque changement significatif, R ne diffuse que les modifications d'information d'état de liens qu'il a détecté. La diffusion concerne un sous-réseau nommé aire ou zone (*area*)
  - Chaque nœud R entretien une table de routage composée de rangées [D , V , d_{RD}] = Nœud destination, Nœud suivant, coût total
    et la réception de paquet d'information d'état de lien implique la mise à jour de la table suivant l'algorithme de Dijkstra
- **OSPF** (*Open Shortest Path First*) est un routage d'internet qui utilise ce routage par information d'état de liens



Exemple de table de routage

Exemple d'une table de routage IPv4 sur un ordinateur (192.168.0.100) connecté à Internet via une box (192.168.0.1)

Réseau destination (format CIDR)	Masque	Passerelle	Interface	Métrique
0.0.0.0/0	0.0.0.0	192.168.0.1	192.168.0.100	1
127.0.0.0/8	255.0.0.0	127.0.0.1	127.0.0.1	1
192.168.0.0/24	255.255.255.0	192.168.0.100	192.168.0.100	1
192.168.0.100/32	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	1
192.168.0.1/32	255.255.255.255	192.168.0.100	192.168.0.100	1

Exemple de table de routage

Route par défaut

- Réseau destination : **0.0.0.0/0**
- Il s'agit de la route par défaut, utilisée lorsqu'aucune autre route ne correspond
- Tous les paquets qui ne correspondent à aucune autre entrée seront envoyés au routeur 192.168.0.1 via l'interface 192.168.0.100

Réseau de bouclage (Loopback)

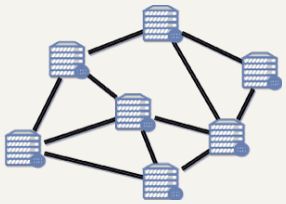
- Réseau destination : **127.0.0.0/8**
- Cette entrée gère le trafic pour le réseau de bouclage (localhost)
- Les paquets destinés à ce réseau sont acheminés vers l'interface 127.0.0.1

Réseau local

- Réseau destination : **192.168.0.0/24**
- Cette entrée concerne le réseau local 192.168.0.0/24
- Les paquets destinés à ce réseau sont acheminés directement via l'interface 192.168.0.100

Adresse IP spécifique

- Réseau destination : **192.168.0.100/32**
- Cette entrée est spécifique à l'adresse IP 192.168.0.100
- Les paquets destinés à cette adresse sont acheminés via l'interface de bouclage 127.0.0.1



Exemple de table de routage

Adresse IP spécifique

- Réseau destination : **192.168.0.1/32**
- Cette entrée est spécifique à l'adresse IP 192.168.0.1 (probablement la passerelle par défaut)
- Les paquets destinés à cette adresse sont acheminés via l'interface 192.168.0.100

Informations complémentaires

- Le masque indique quels bits de l'adresse IP correspondent au réseau.
- La passerelle est l'adresse IP du prochain saut pour atteindre le réseau de destination.
- L'interface est l'interface réseau utilisée pour envoyer les paquets.
- La métrique (toujours 1 ici) est utilisée pour déterminer la meilleure route lorsque plusieurs routes sont disponibles.

Protocoles de routage

RIP (*Routing Information Protocol*) ; RFC 1058 et RFC 1721 à 1723 pour RIP-2

- Protocole simple parfois utilisé en Intranet
- Anciennement utilisé dans internet, mais remplacé par les protocoles ci-dessous.

OSPF (*Open Shortest Path First*)

- Protocole de routage interne IP, de type 'à état de lien de liens'.
- OSPFv2 est décrite dans la RFC 2328 en 1997
- OSPFv3 permet l'utilisation d'OSPF dans un réseau IPv6. Voir RFC 2740

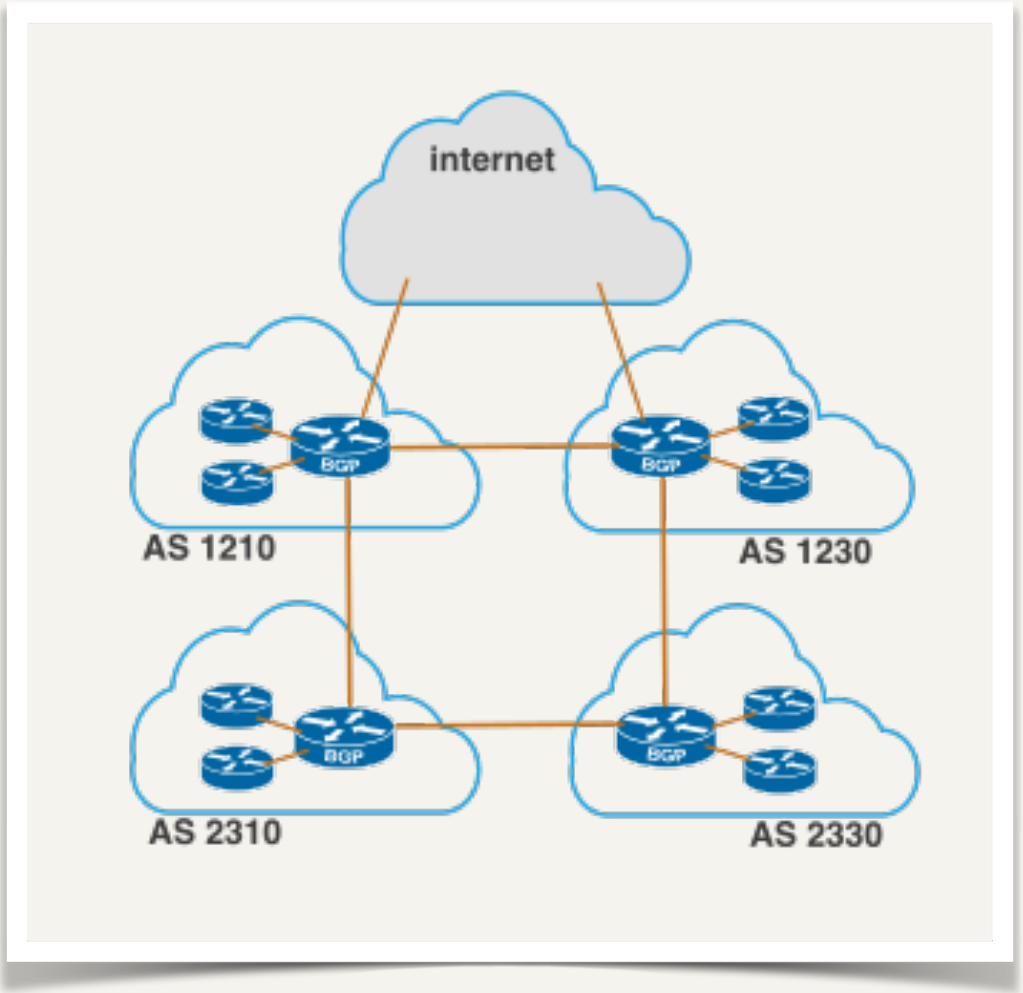
IS-IS (*Intermediate system to intermediate system*)

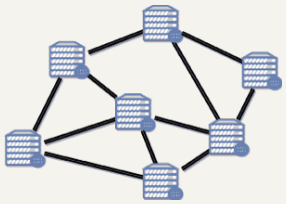
- Protocole de routage interne multi-protocoles à état de liens
- Norme ISO/CEI 10589:2002 également publié par l'IETF avec la RFC 1142
- IS-IS est un protocole à état de liens utilisé à l'intérieur d'un *autonomous system*. Il est apprécié dans des grands réseaux de fournisseurs de services.

Protocoles de routage

BGP (*Border Gateway Protocol*)

- Protocole d'échange d'informations de routage entre *Autonomous Systems* (AS). RFC 4271.
- BGP prend en charge le routage sans classe et utilise l'agrégation de routes afin de limiter la taille de la table de routage.
- La stratégie de routage tient compte de contraintes politiques, économiques ou de sécurité
- BGP est principalement utilisé entre les opérateurs et fournisseurs d'accès à Internet pour l'échange de routes, à travers des services de transit ou de peering.





Besoins d'interconnexion

Lorsque plusieurs réseaux sont interconnectés, on parle d'**inter-réseau** ou de réseau de réseaux

- Le terme **internet** provient justement d'**internetwork**

Grande diversité des réseaux, des technologies et des besoins d'inter-connexion

- Type de service (avec ou sans connexion)
- Protocole (IP, IPX, ATM, MPLS, etc.)
- Adressage
- Taille de paquets
- Qualité de service
- Contrôle de flux et de congestion
- Sécurité (règles de confidentialité, chiffrement, etc.)
- Facturation

Équipements d'interconnexion

Au dessous de la couche réseau, on trouve :

- Les **répéteurs** et les **hubs** (couche physique)
- Les **ponts** et les **commutateurs** (couche liaison de données)
  - Copier et faire suivre des trames

Les passerelles opèrent à des couches supérieures à la couche réseau

Les équipements qui opèrent au niveau de la couche réseau sont des **routeurs**

- Le routeur utilise des adresses logiques (de niveau 3), indépendantes des adresses physiques

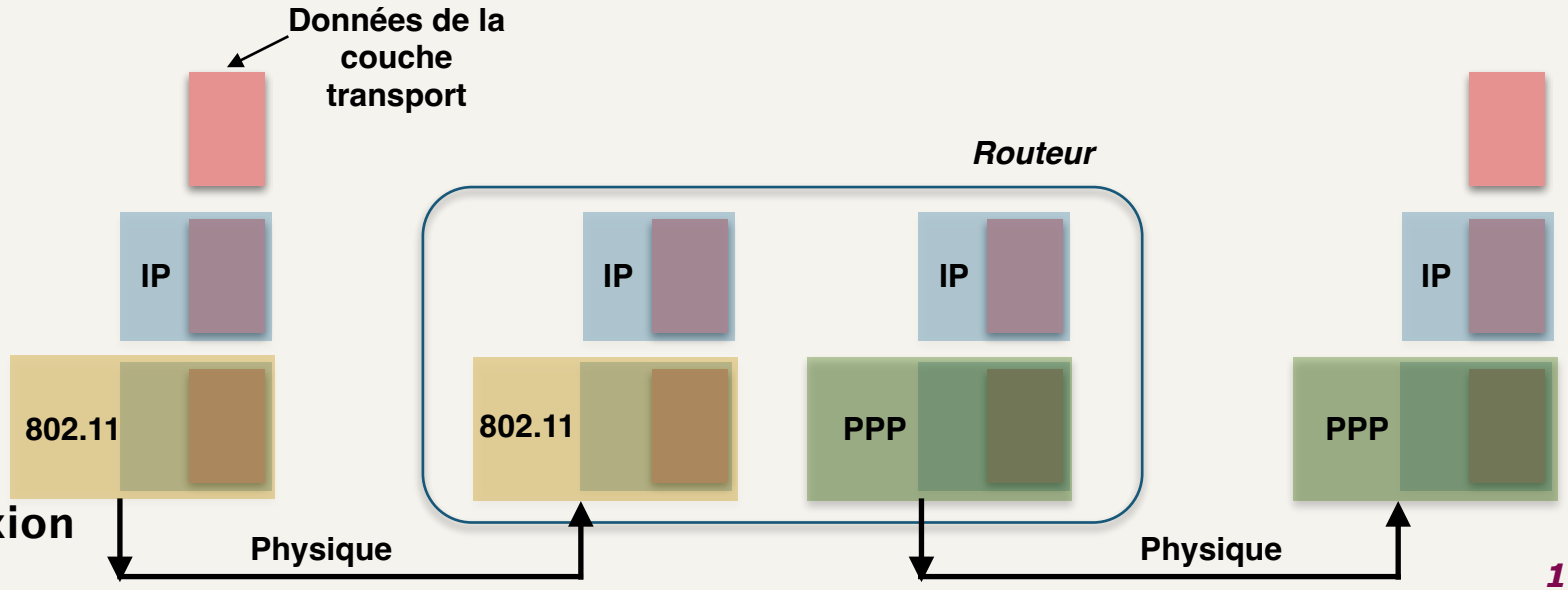
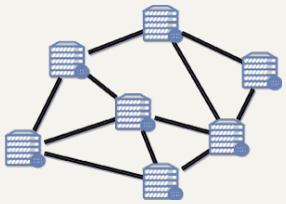


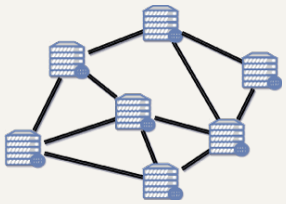
Fig 4.4 - Interconnexion avec un routeur



Équipements d'interconnexion

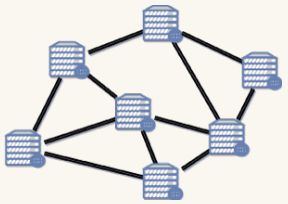
La **technique du tunnel**

- Les machines d'extrémité sont sur un réseau de même type, mais elles sont séparées par un réseau différent
- Une solution d'interconnexion passe par la technique du tunnel ou le paquet source est encapsulé par le routeur qui ajoute son entête de niveau 3
- Cette technique est souvent utilisée au niveau de couche supérieure (**VPN** = *Virtual Private Network*)



Architecture TCP/IP

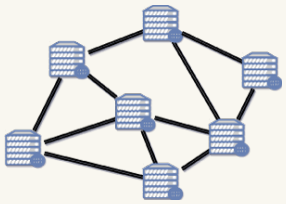
- **Dans cette partie, ou presque :**
  - Historique *(recherche personnelle à faire)*
  - La couche Internet ; le protocole IP
  - Les adresses IP v4
  - Sous réseaux
  - IP v6
  - Autres protocoles de la couche internet
  - La couche transport de TCP/IP (Ch. 5)



Couche internet

- Nommée couche ***internet*** ou couche ***inter-réseau***
- Au même niveau de la couche **réseau** d'OSI
- Objectif :
  - Permettre aux hôtes d'introduire des paquets nommés datagrammes sur n'importe quel réseau
  - Acheminer ces datagrammes indépendamment les uns des autres jusqu'à destination.

- Des datagrammes peuvent arriver dans un ordre différent, ou se perdre



Couche internet

- La couche internet définit :
  - Un **protocole** nommé **IP** (*Internet Protocol*)
  - Le format des datagrammes IP
  - Un protocole compagnon, **ICMP** (*Internet Control Message Protocol*), qui assure le routage des datagrammes et la gestion des congestions

- Le protocole IP (*Internet Protocol*) est **non fiable**, **sans connexion**
- Si une fiabilité est nécessaire pour le transfert de données, elle sera assurée par le protocole TCP (*Transmission Control Protocol*) de la couche transport

L'en-tête du datagramme IPv4

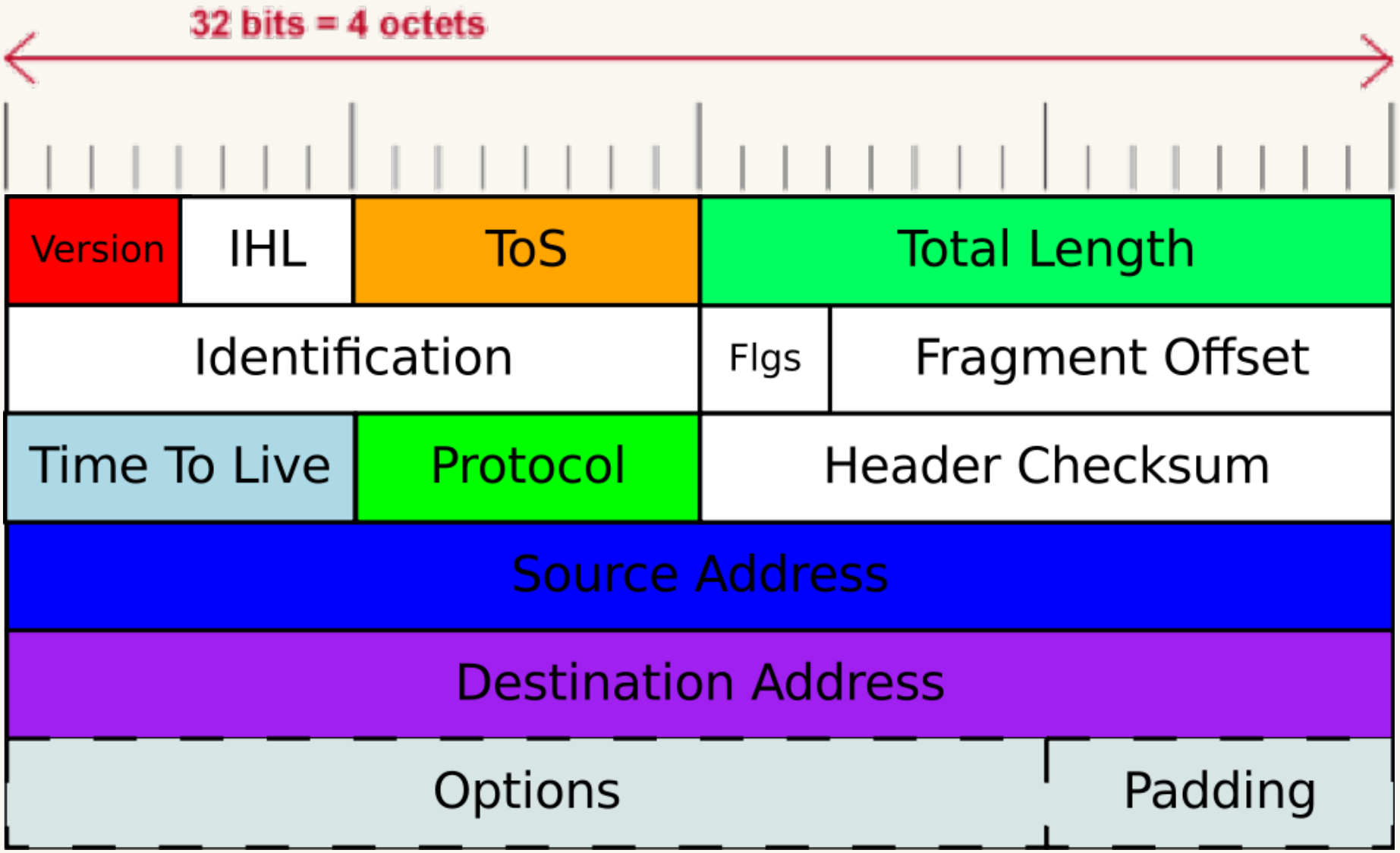


Fig 4.5 - L'en-tête du datagramme IPv4

Le datagramme IPv4

- L'en-tête est de 20 à 60 octets
  - **Version IP (4 bits) = 4**
  - **IHL**, *Internet Header Lenght ; l*ongueur en-tête en nombre de mots de 32 bits (4 bits)
  - **ToS**, Type de service ; (8 bits)
  - **Longueur totale, en octets, du datagramme (16 bits)**
  - Identification ; identifier les fragments d'un paquets(16 bits)
  - *Flgs* : Indicateurs ou Flags (3 bits)
  - *Fragment offset* (13 bits)
  - **TTL, Time To Live : Durée de vie (8 bits)**
  - **Protocol** ; n° de protocole de transport (8 bits)
  - *Header Checksum* ; somme de contrôle de l'en-tête (16 bits)
  - **Adresse source (32 bits)**
  - **Adresse destination (32 bits)**
  - Options (0 à 40 octets)
  - *Padding* ; remplissage ; tel que l'en-tête soit un multiple de 32 bits

L'en-tête du datagramme IPv6

- Un en-tête IPv6 de 40 octets

Adresses IPv6 de 16 octets, soit 128 bits

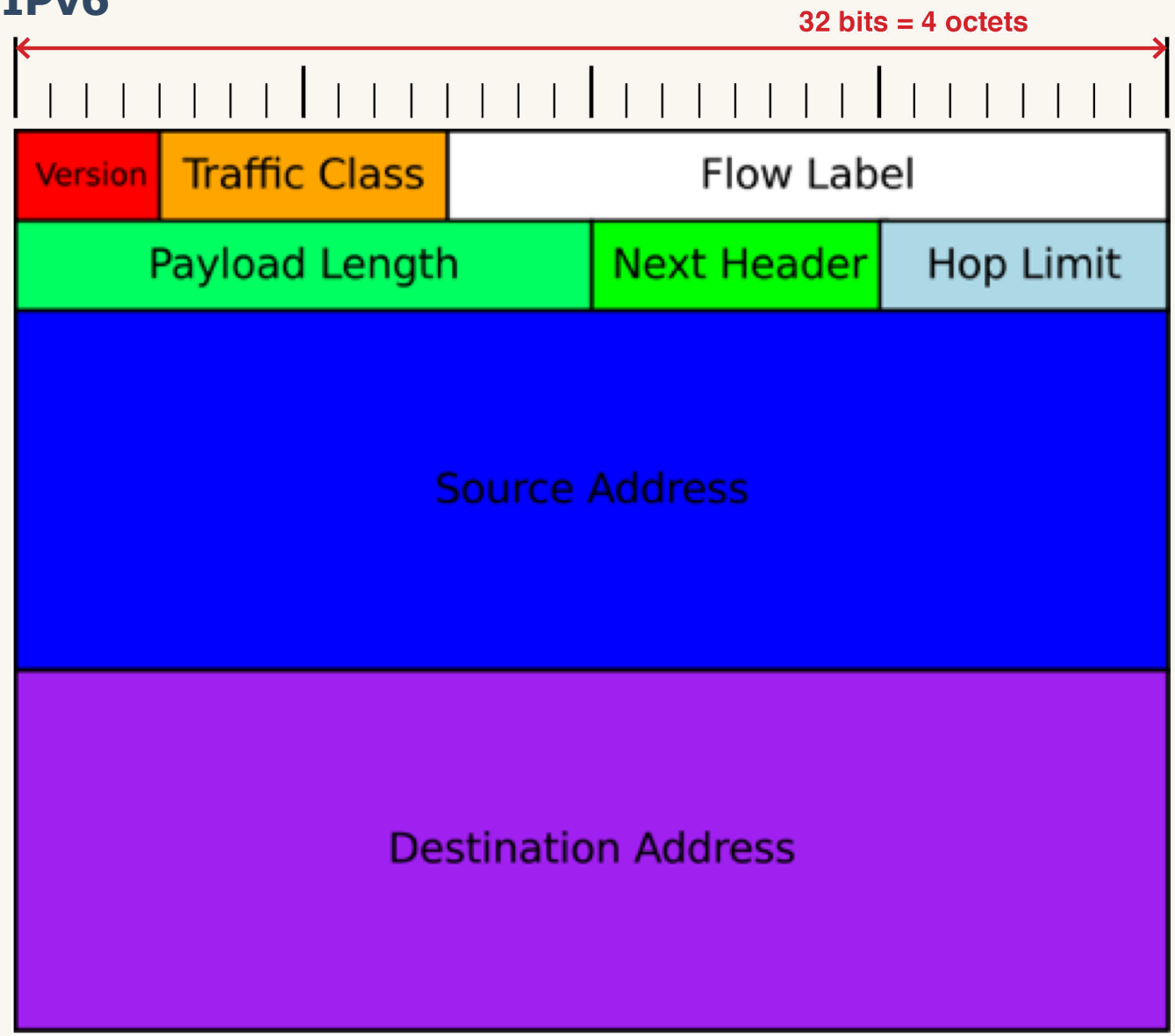


Fig 4.6 - L'en-tête du datagramme IPv6

L'en-tête du datagramme IPv6

- **Version IP** (4 bits) = 6
- *Traffic class* : Classe de trafic ; QoS et indication de congestion (8 bits)
- *Flow label* : Marquage de flux (20 bits)
- *Payload length* : Taille de la charge utile en octets (16 bits)
- *Next header* : Type de l'en-tête suivant (8 bits)
- *Hop limit* : TTL ou Time To Live ou nombre limite de sauts (8 bits)
- **Adresse source** (128 bits)
- **Adresse destination** (128 bits)

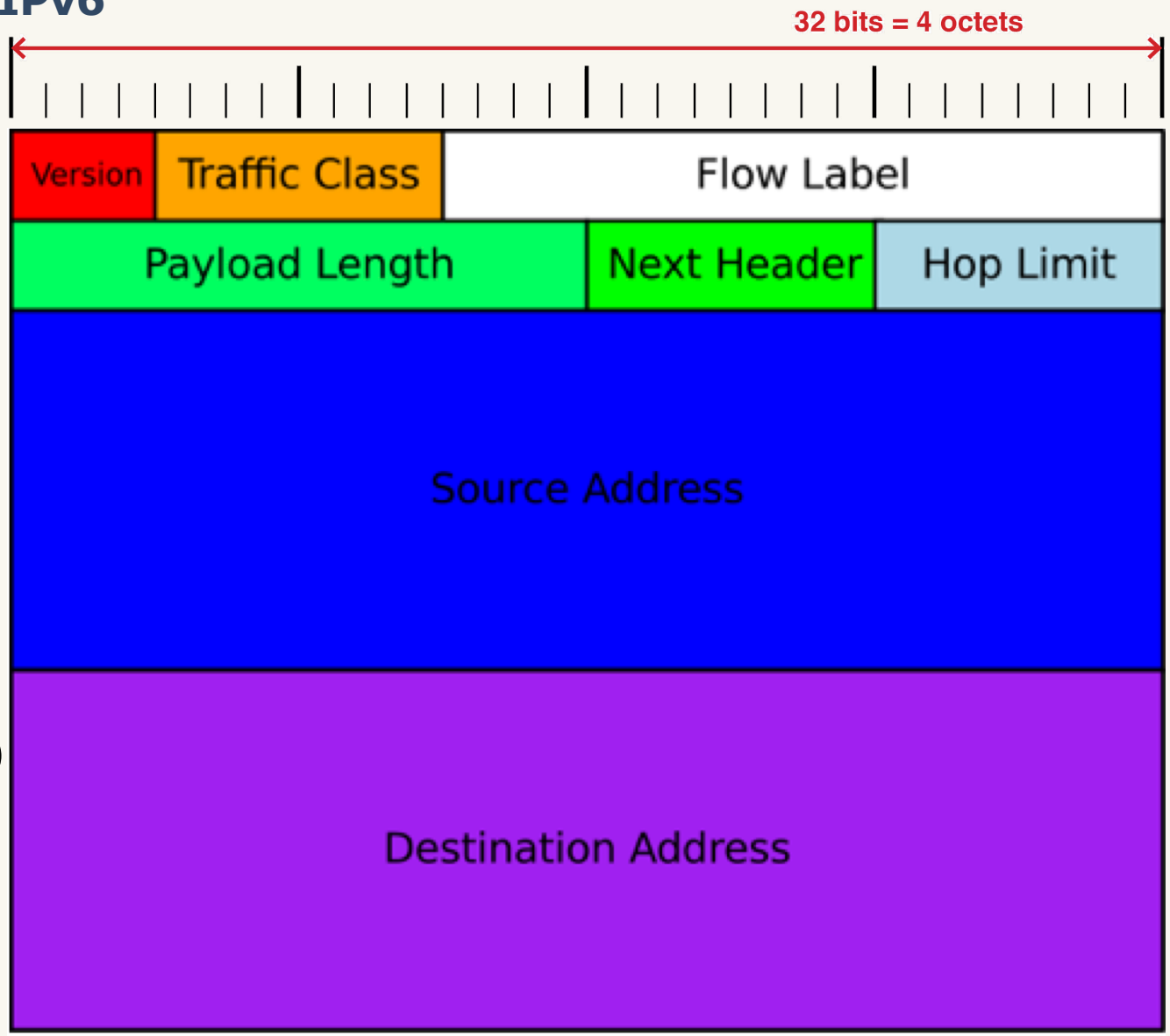
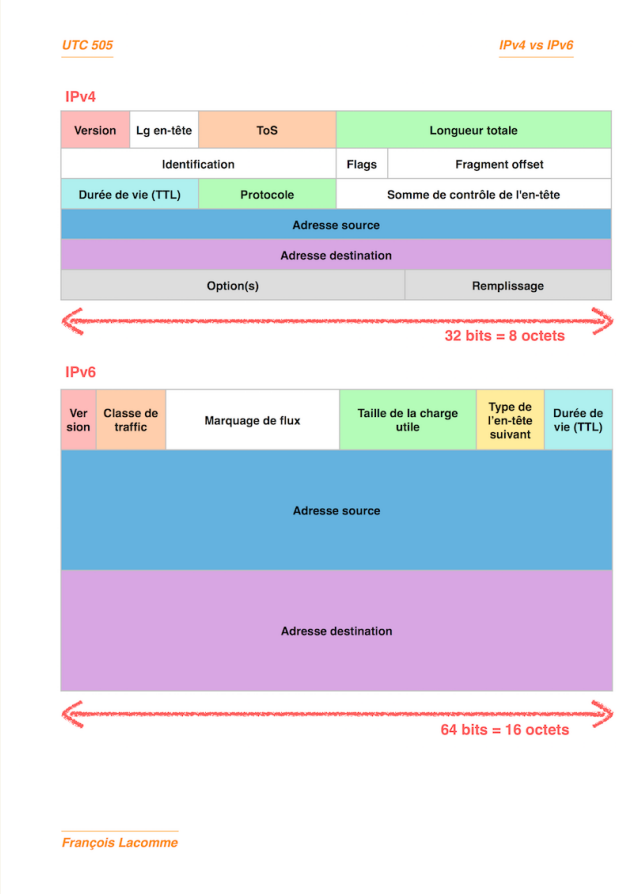


Fig 4.6 - L'en-tête du datagramme IPv6

Comparaison des en-têtes IPv4 et IPv6

- Voir : utc505.seancetenante.com/documents/IPv4-vs-IPv6.pdf



Introduction

- Une adresse IPv4
  - Une valeur sur **32 bits** (4 octets) qui identifie **de façon unique** chaque interface réseau d'**un réseau** TCP/IP
  - Par convention on exprime une adresse IPv4 avec la notation **décimale pointée** :
    4 octets exprimés en décimal, séparés par des points « . »

- Exemple 1 :
  - `192.41.6.120` en décimal pointé
  - `11000000 00101001 00000110 01111000` en binaire

- `41 = 128x0 + 64x0 + 32x1 + 16x0 + 8x1 + 4x0 + 2x0 + 1x1`
- Comment convertir du décimal en binaire :
  - fr.wikihow.com/convertir-du-décimal-en-binaire

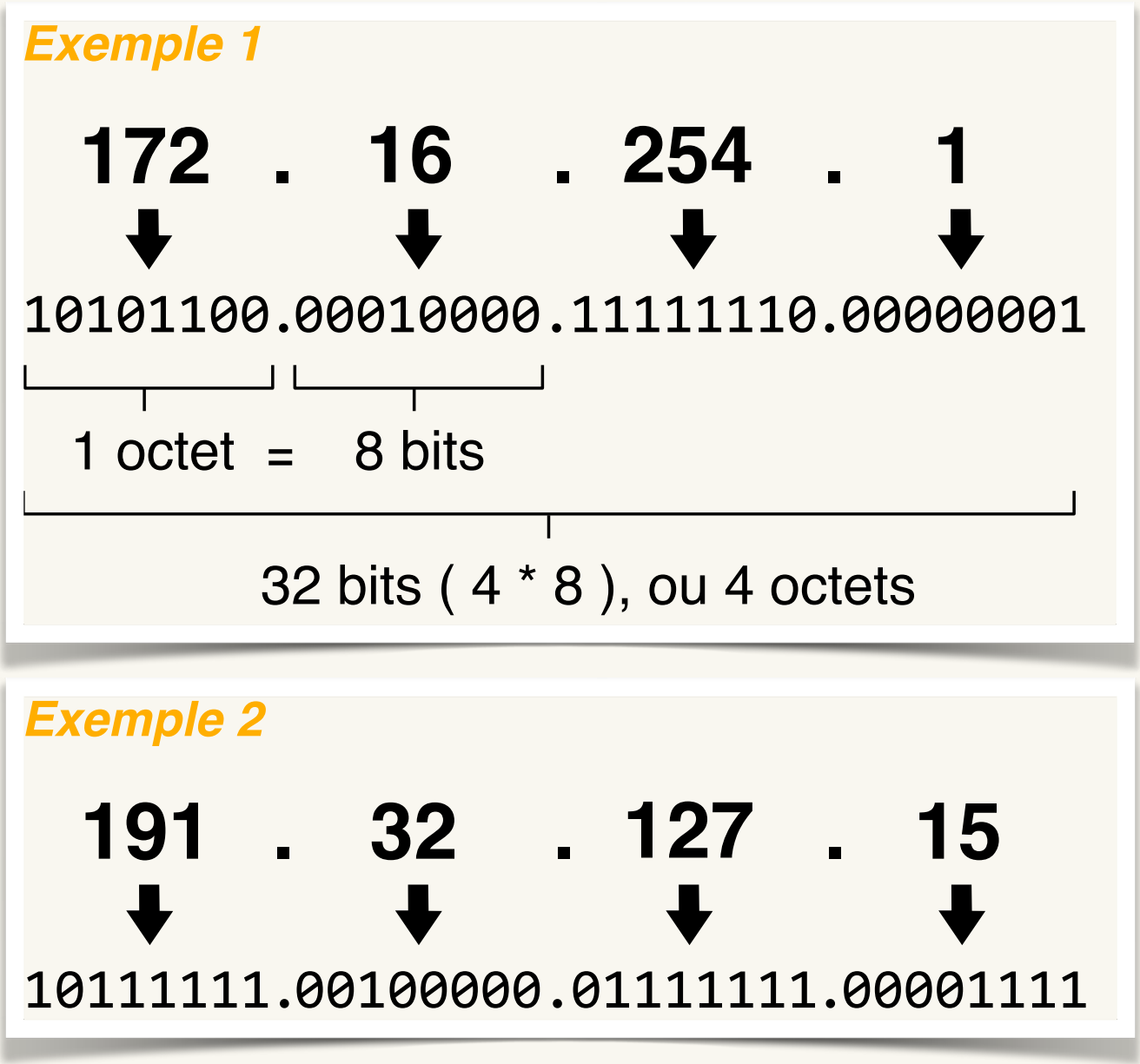
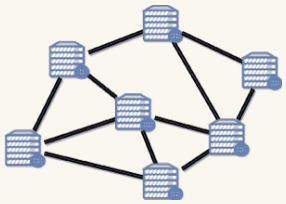


Fig 4.7 -Deux exemples de conversion d'adresse IP (décimal vers binaire)



Structure d'une adresse IPv4

- Une adresse IPv4 permet d'identifier :
  - un **réseau**
  - **l'interface réseau** d'un équipement sur **ce réseau** [on parle, improprement, d'hôte (*host*)]

- Pour déterminer l'**identifiant réseau**, on doit connaitre le **masque d'adresse**
- Un masque d'adresse est **une suite de bits à 1** suivie d'**une suite de bits à 0** (le tout sur 32 bits)

Masque d'adresse

- On exprime un masque d'adresse :
  - soit avec la **longueur du préfixe**, donc le nombre de bits à 1 (ex. /20)
    - Cette longueur du préfixe est souvent abrégé en '**préfixe**'
    - On parle de **notation CIDR** (*Classless Inter-Domain Routing*)
  - soit en **décimal pointé** (ex. 255.255.240.0)

- Un **ET logique** (∧) entre une adresse et un masque permet de déterminer **l'identifiant réseau**

- L'**adresse IPv4 ∧ le complément à un du masque** détermine **l'identifiant d'une interface-réseau** (ou, improprement, l'identifiant d'hôte [*host ID*])

- Exemple 1
  - Identifiant réseau

```
   172. 16.254.   1     10101100.00010000.11111110.00000001
∧  255.255.255.   0     11111111.11111111.11111111.00000000
   ---------------------------------------------------------
=  172. 16.254.   0     10101100.00010000.11111110.00000000
```

  - Identifiant d'hôte *(ou plutôt d'interface réseau)* dans un réseau

```
   172. 16.254.   1     10101100.00010000.11111110.00000001
∧    0.   0.   0.255     00000000.00000000.00000000.11111111
   ---------------------------------------------------------
=    0.   0.   0.   1     00000000.00000000.00000000.00000001
```

Fig 4.8 - Exemple 1 de calcul des identifiants réseau et hôte d'une adresse IPv4

- Exemple 2
  - Identifiant réseau

```
   191. 32.127.15     10111111.00100000.01111111.00001111
∧  255.255.240. 0     11111111.11111111.11110000.00000000
   ___________________ ____________________________________
=  191. 32.112. 0     10111111.00100000.01110000.00000000
```

  - Identifiant d'hôte *(ou plutôt d'interface réseau)* dans un réseau

```
   191. 32.127. 15    10111111.00100000.01111111.00001111
∧    0.  0. 15.255    00000000.00000000.00001111.11111111
   ___________________ ____________________________________
=    0.  0. 15. 15    00000000.00000000.00001111.00001111
```


Fig 4.9 - Exemple 2 de calcul des identifiants réseau et hôte d'une adresse IPv4

Masque naturel

- Si aucune indication de masque d'adresse n'est donnée pour une adresse IPv4, on utilise Le **masque naturel** ou **masque d'adresse par défaut**.
- Le masque naturel est déterminé en fonction d'une ancienne subdivision de l'espace d'adressage d'IP v4 en **5 classes d'adresse**

Classe	Bits de départ	Début	Fin	Notation CIDR	Masque de sous-réseau par défaut
Classe A	0	0.0.0.0	127.255.255.255	/8	255.0.0.0
Classe B	10	128.0.0.0	191.255.255.255	/16	255.255.0.0
Classe C	110	192.0.0.0	223.255.255.255	/24	255.255.255.0
Classe D (multicast)	1110	224.0.0.0	239.255.255.255	/8	non défini
Classe E (réservée)	1111	240.0.0.0	255.255.255.255		non défini

Fig 4.10 - Tableau de 5 classes d'adresse

Masque de sous-réseau

- *Subnetting* : technique qui consiste à diviser un réseau plus large en **plusieurs sous-réseaux**
- Pour subdiviser un réseau en sous-réseaux (*subnet*), on applique **un autre masque d'adresse**.
- On divise en fait la partie « identifiant d'hôte » en 2 parties :
  - un identifiant de sous-réseau (*Subnet number*)
  - un identifiant d'hôte sur un sous-réseau (*Host number*)

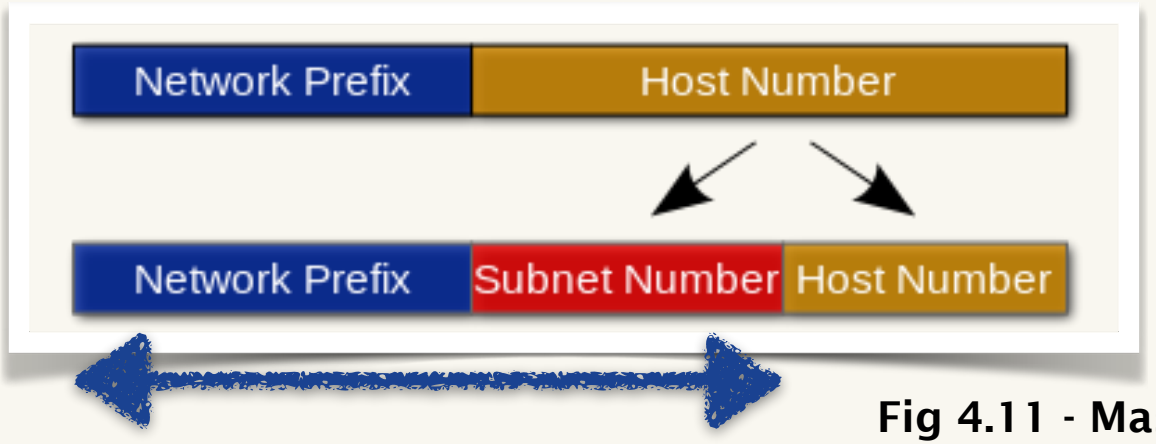


Fig 4.11 - Masque de sous-réseau

- Le masque d'adresse local, ou masque de sous-réseau s'étend jusqu'au champ « **identifiant de sous-réseau** »

Exemples

- Exemple 1
  - Une entreprise dispose du bloc d'adresse : 197.201.30.0 / 24
    - Le masque associé est donc : 255.255.255.0
  - On souhaite créer 16 sous-réseaux :
    - Le masque de sous-réseau voit sa longueur augmenter de 4 (car $2^4 = 16$)
    - ce masque devient donc 255.255.255.240
      - car 240 ≡ `11110000`$_b$
      - (on peut écrire « 255.255.255.11110000 » si cela facilite les calculs)
  - Le bloc devient : 197.201.30.0 / 28 pour le premier sous-réseau
    - Les trois premiers octets sont ceux de l'adresse réseau : 197.201.30.0
    - les quatre bits de poids forts du 4e octet donne l'adresse de sous-réseau
    - les quatre bits de poids faible du 4e octet donne l'identifiant d'hôte dans le sous-réseau

Exemples

- (Suite exemple 1)
  - Le premier sous-réseau, 197.201.30.0 / 28, peut contenir les hôtes d'adresses 197.201.30.1 à 197.201.30.14
  - Il est en effet d'usage d'exclure 197.201.30.0 (qui identifie ce 1er sous-réseau) et 197.201.30.15, qui est utilisé pour une diffusion dans ce sous-réseau.

  - Comment s'écrit le 2e sous-réseau ?
    - ➡ 197.201.30.16 / 28

Exemples

- Exemple 2
  - Un datagramme IP a pour champs d'adresse IPv4 :
    - Adresse source = 193.49.66.200
    - Adresse destination = 193.49.66.29
  - Où se trouvent les ordinateurs source (S) et destination (D) par rapport :
    - Au réseau de préfixe /24 ?
    - Aux sous-réseaux de préfixe /28 ?
  - ➡ S et D sont sur le même réseau 193.49.66.0 / 24
    - Le masque d'adresse est 255.255.255.0
    - Pour S comme pour D, l'identifiant réseau vaut 193.49.66.0

Exemples

- (Suite exemple 2)

	Adresse IP	Dernier octet en binaire
	_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _	_ _ _ _ _ _ _ _
S	193. 49. 66.200	1100'1000
D	193. 49. 66. 29	0001'1101
M	255.255.255.240	1111'0000
S∧M	193. 49. 66.192	1100'0000
D∧M	193. 49. 66. 16	0001'0000

- S est sur le sous-réseau 193.49.66.192 / 28
- D est sur un autre sous-réseau 193.49.66.16 / 28

Exemples

- (Suite exemple 2)
  - On peut ausi utiliser une notation mixte 'décimal.binaire' :

	Adresse IP	Notation mixte
S	193. 49. 66.200	193. 49. 66.1100'1000
D	193. 49. 66. 29	193. 49. 66.0001'1101
M	255.255.255.240	255.255.255.1111'0000
S∧M	193. 49. 66.192	193. 49. 66.1100'0000
D∧M	193. 49. 66. 16	193. 49. 66.0001'0000

  - ➡ S est sur le sous-réseau 193.49.66.192 / 28
  - ➡ D est sur un autre sous-réseau 193.49.66.16 / 28

Agrégation d'adresses - CIDR

- Face à la taille croissante d'Internet, **CIDR**, *Classless Inter-Domain Routing* est mis au point dès 1993 afin de réduire les tailles de table de routage.
- **CIDR** (qui se prononce '*cider*') rend la notion de classe d'adresse obsolète
- L'idée est de :
  - permettre le découpage de l'espace d'adressage en **blocs de taille variable**
  - distribuer les blocs d'adresses contiguës à des gros FAI (Fournisseur d'accès à Internet = ISP = *Internet Service Provider*) et en tenant compte de la topologie du réseau
  - modifier les protocoles de routage pour qu'une adresse IP soit accompagnée de la longueur du préfixe associée (VLSM : *Variable-Length Subnet Mask*)

Adresses particulières

- **0.0.0.0 :**
  - soit la route par défaut des tables de routage (la passerelle par défaut)
  - soit « cet hôte » (au démarrage d'une station)
- **Id_réseau à 0** : ce réseau local. Ex. 0.0.0.108 => l'hôte #108 sur ce réseau local
- **Id_hôte tout à 1** : diffusion sur ce réseau
- **255.255.255.255** : *Broadcast* (diffusion générale) sur le réseau local
- **127.0.0.0/8** : test de bouclage. On utilise plutôt 127.0.0.1 (≃ ***localhost***)
- **169.254.0.0/16** : adresses locales auto-configurées (RFC 3927)
  - APIPA (*Automatic Private Internet Protocol Addressing*)
  - Lorsqu'il n'y a pas de serveur DHCP

Adressage privé

- Le RFC 1918 réserve des plages d'adresses à usage **privé**
  - **Non routées** sur internet
  - Au sein de réseaux locaux

Préfixe	Plage d'adresse	Nombre d'adresses
10.0.0.0 / 8	10.0.0.0 – 10.255.255.255	16 777 216
172.16.0.0 /12	172.16.0.0 – 172.31.255.255	1 048 576
192.168.0.0 /16	192.168.0.0 – 192.168.255.255	65 536

- Pour relier un réseau privé à l'Internet, on utilise NAT (*Network address translation*), généralement intégré à un routeur, ou NAPT (*Network address & port translation*)

NAPT (*Network Address and Port Translation*)

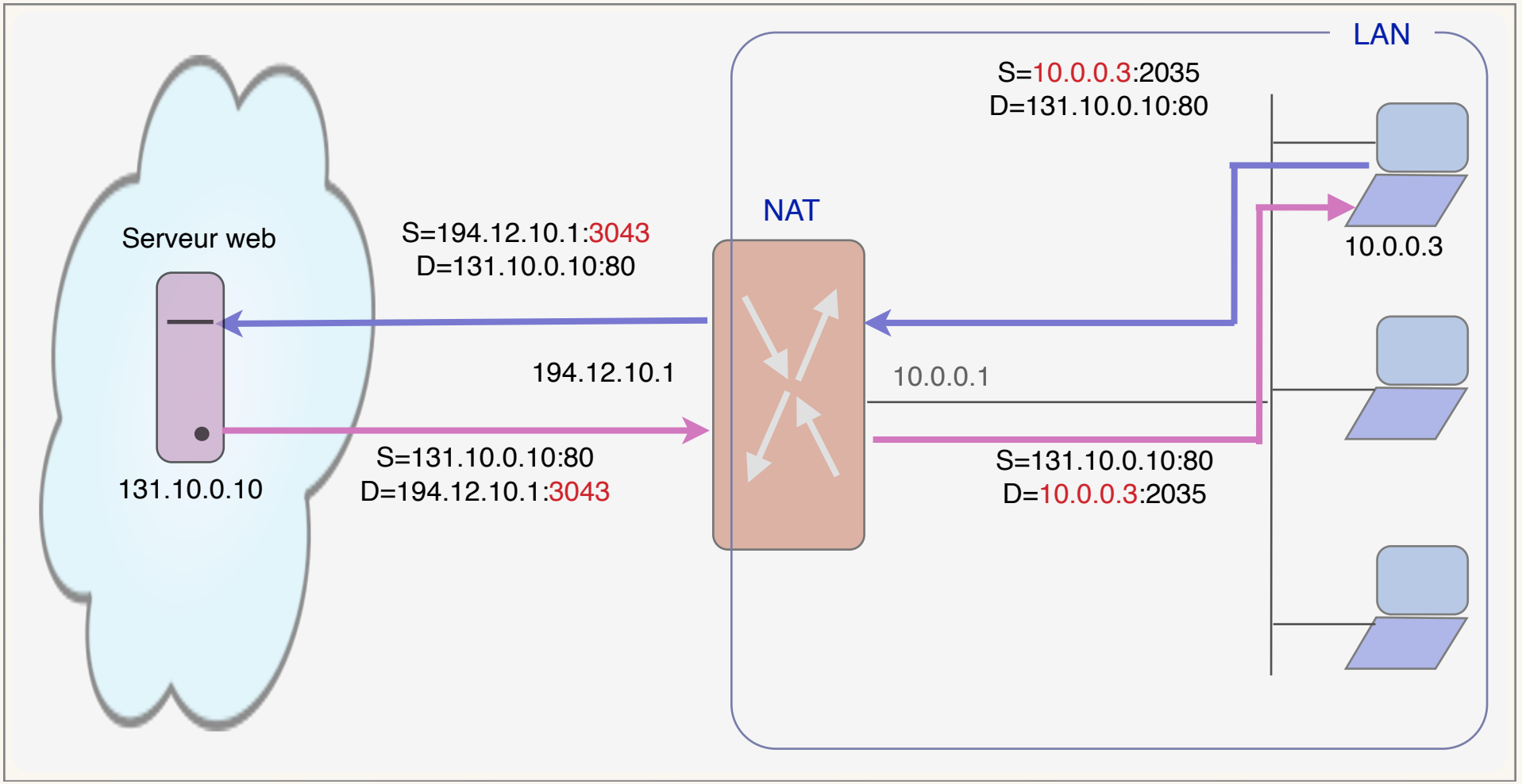


Fig 4.12 -Fonction NAPT d'un routeur

Configuration dynamique

- La **configuration dynamique** d'interface réseau est la plus simple
  - L'ensemble des paramètres IP est délivré par un **serveur DHCP** (*Dynamic Host Configuration Protocol*)
  - Ce serveur DHCP peut être associé au routeur de bordure du réseau local

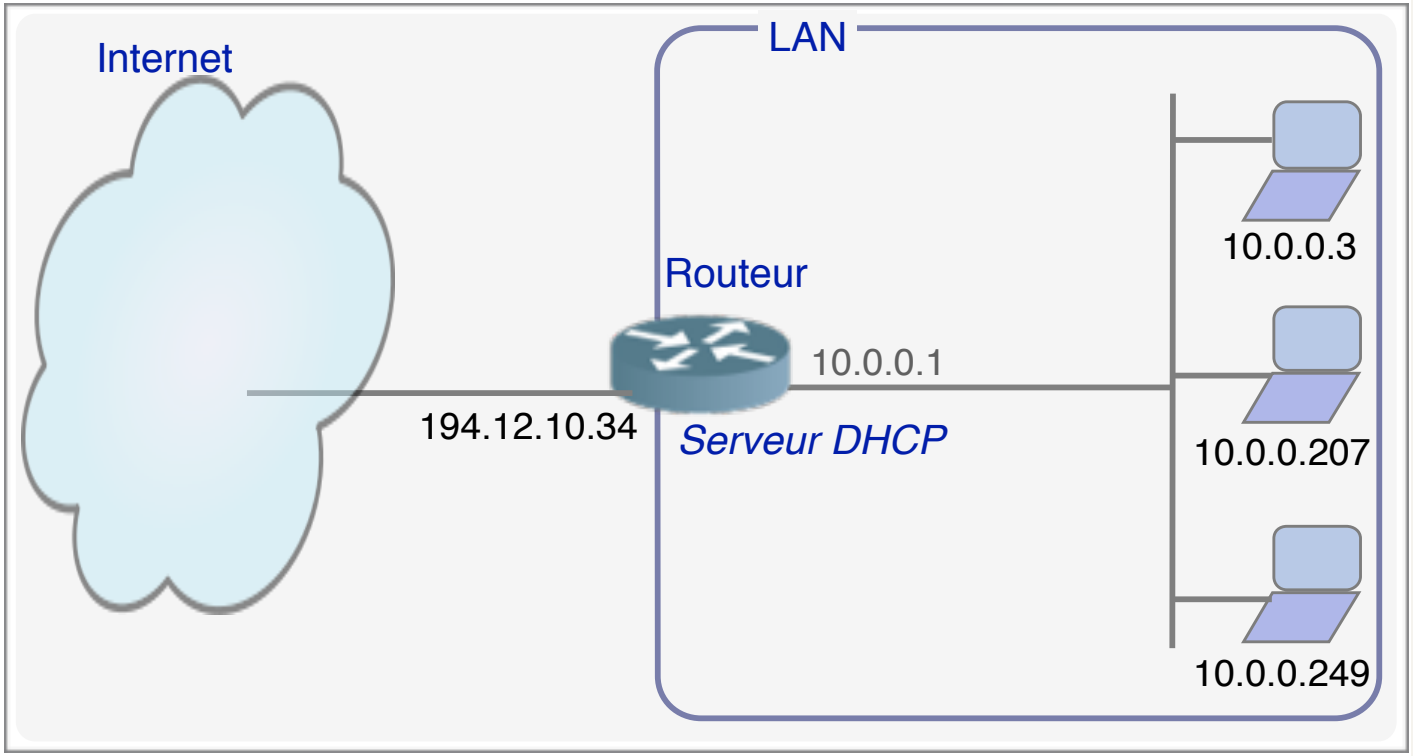


Fig 4.13 - Serveur DHCP associé à un routeur

Configuration dynamique

- Avec Windows 10, 8.1 ou 7
  - Lien : https://support.microsoft.com/fr-fr/windows/modifier-les-paramètres-tcp-ip-bd0a07af-15f5-cd6a-363f-ca2b6f391ace
  - Éditez les propriétés de la connexion (interface réseau) a modifier, puis éditez les propriétés de l'élément « *Protocole Internet version 4 (TCP/IPv4).*

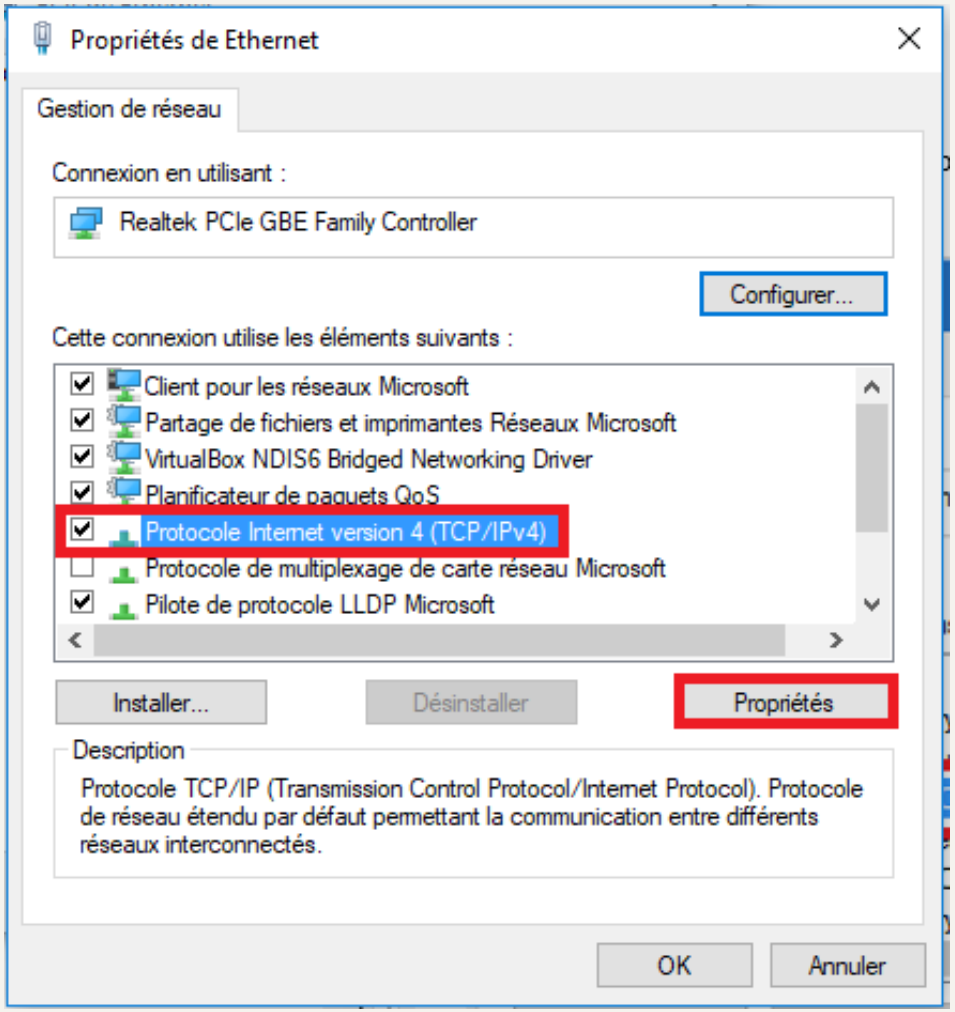


Fig 4.14 - Propriétés de 'Protocole Internet v4' sous Windows

Configuration dynamique

- Avec Windows 11, 10, 8.1 ou 7
  - Lien : https://support.microsoft.com/fr-fr/windows/modifier-les-paramètres-tcp-ip-bd0a07af-15f5-cd6a-363f-ca2b6f391ace
  - Éditez les propriétés de la connexion (interface réseau) a modifier, puis éditez les propriétés de l'élément « *Protocole Internet version 4 (TCP/IPv4).*
  - Cochez « *Obtenir une adresse IP automatiquement* » pour utiliser le protocole DHCP.

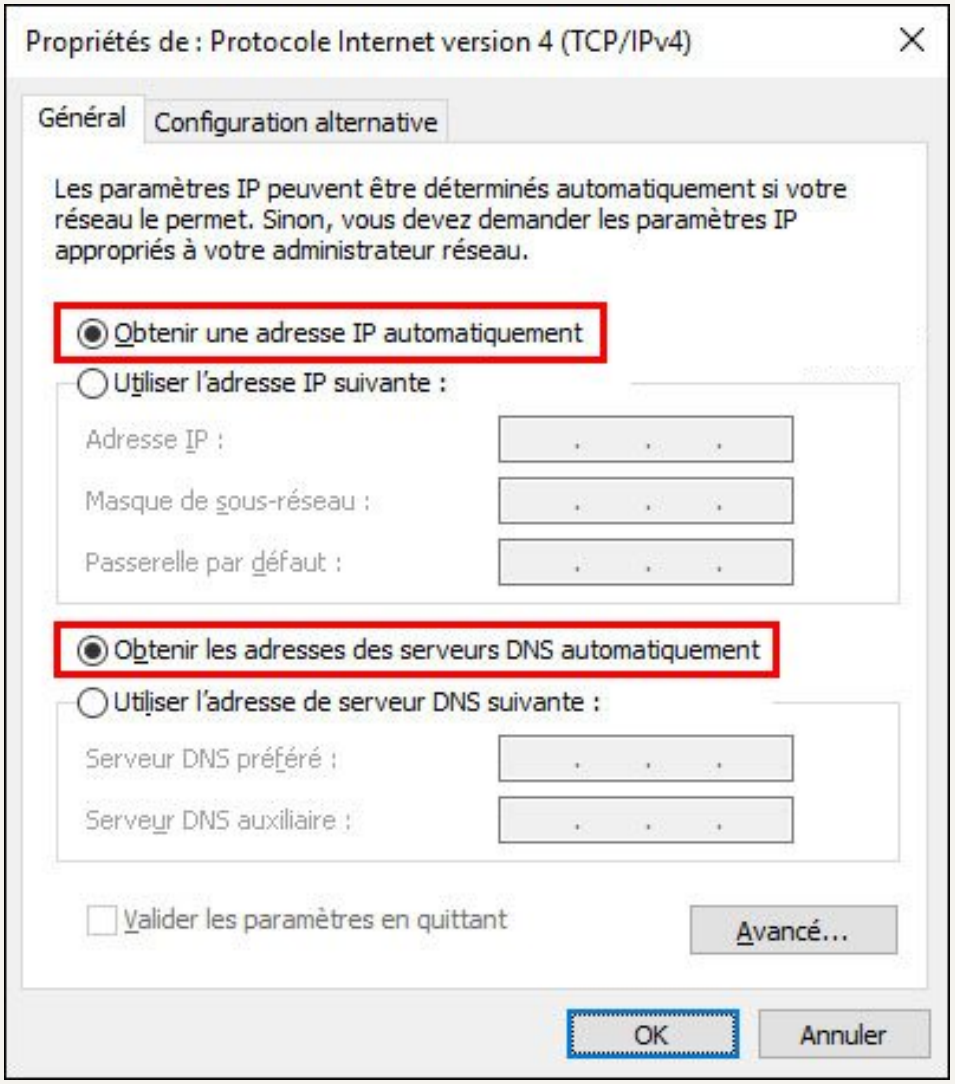


Fig 4.14 - Propriétés de 'Protocole Internet v4' sous Windows

Configuration dynamique

- Avec macOS
  - Lien : support.apple.com/fr-fr/guide/mac-help/mchlp2718/mac
  - Préférences Système / Réseau / Sélectionner un service de connexion
  - Avec le menu déroulant « Configurer IPv4 », choisir « **Via DHCP** »

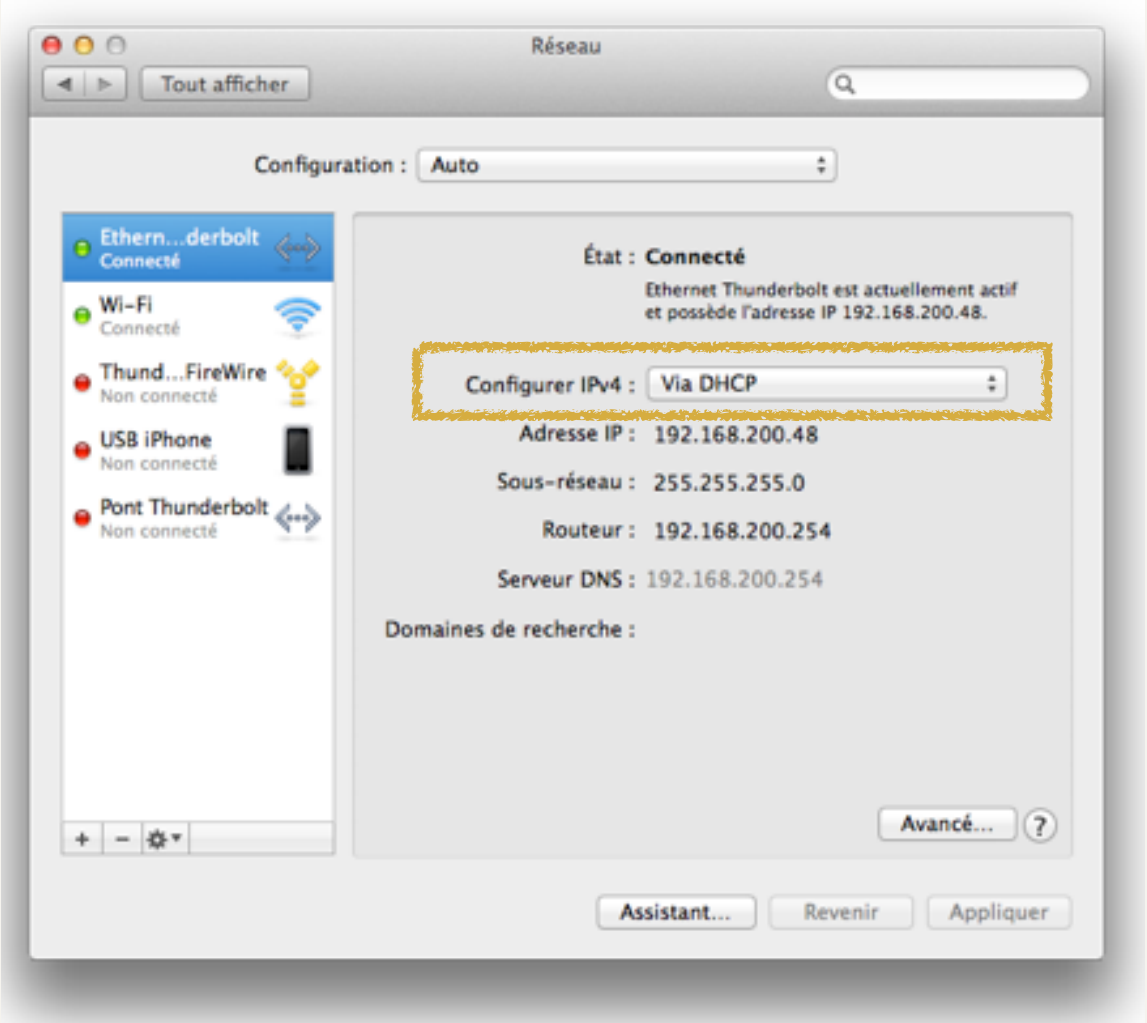


Fig 4.15 - Préférences d'un service de connexion réseau sous macOS

Configuration dynamique

- Avec macOS
  - Lien : support.apple.com/fr-fr/guide/mac-help/mchlp2718/mac
  - Préférences Système / Réseau / Sélectionner un service de connexion
  - Avec le menu déroulant « Configurer IPv4 », choisir « **Via DHCP** »
  - Le bouton « Avancé… » et l'onglet « TCP/IP » donne des réglages avancés

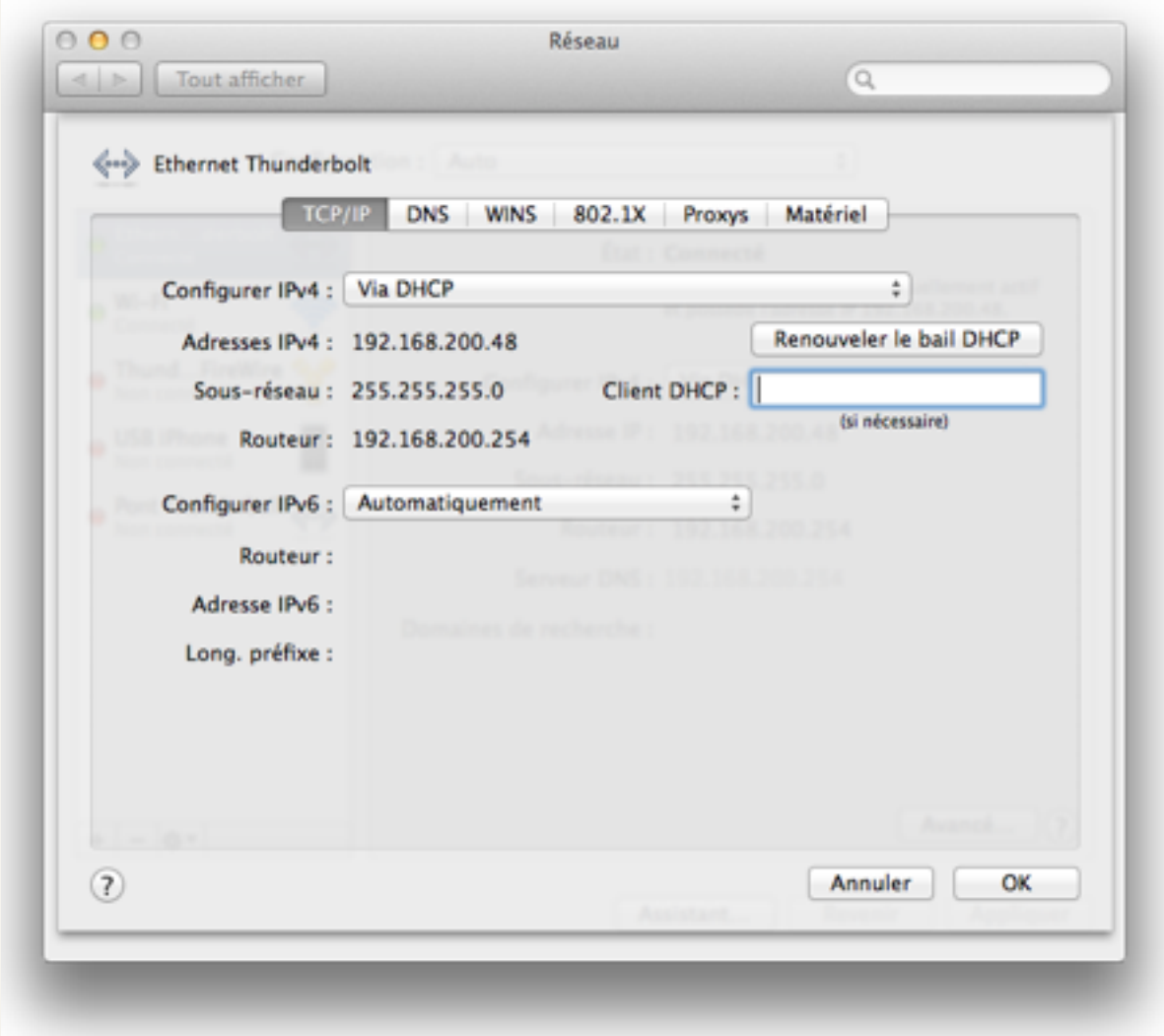


Fig 4.15 - Préférences d'un service de connexion réseau sous OS X

Configuration fixe

- Avec une configuration fixe, les propriétés de TCP/IP (partie adresse IP) sont réglés avec :
  - Une adresse IP
  - Masque de sous-réseau
  - Passerelle par défaut (adresse IP du routeur où seront envoyés les datagrammes hors de portée d'après le masque)

- Nota : d'autres paramètres sont également à renseigner
  - Adresses de serveurs DNS
  - …

Commandes utiles

- Unix et Linux
  - **`ifconfig`**
    - Afficher les informations des interfaces réseau IP actives
  - **`ifconfig -a`**
    - Afficher les informations de toutes les interfaces réseau, actives ou non.

  - La commande **`ifconfig`** est déprécié dans les dernières versions d'Unix. Elle est remplacé par la commande **`ip`**, si le paquet **`iproute2`** est installé.
  - **`ip addr show`** ou son alias **`ip a`**
    - quasi-équivalent à ifconfig

Commandes utiles

- Windows
  - **ipconfig**

```
C:>ipconfig

Configuration IP de Windows

Carte réseau sans fil Connexion réseau sans fil :

   Statut du média. . . . . . . . . . . . : Média déconnecté
   Suffixe DNS propre à la connexion. . . :

Carte Ethernet Connexion au réseau local :

   Suffixe DNS propre à la connexion. . . :
   Adresse IPv6 de liaison locale. . . . .:
fe80::89c9:7d53:f73:c8c4%11
   Adresse IPv4. . . . . . . . . . . . . .: 192.168.1.2
   Masque de sous-réseau. . . . . . . . . : 255.255.255.0
   Passerelle [[par défaut]]. . . . . . . . . . : 192.168.1.1
```

  - **ipconfig /all**
    - Permet d'avoir toutes les caractéristiques des connexions réseaux : adresse IP, adresse MAC…

ICMP - *Internet Control Message Protocol*

- ICMP est le contrôleur de la couche internet
  - RFC 792
  - Message de contrôle et d'erreur
  - Communications entre routeurs
    - Signalisation de congestion
    - Mise à jour de table de routage
  - Un paquet ICMP est encapsulé dans un datagramme IP.
  - Un champ type de message (8 bits) et un champ Code d'erreur (8 bits) sont principalement utilisé. Exemples :
    - Type : 8 ; Code : 0 => demande d'écho (echo-request)
    - Type : 0 ; Code : 0 => réponse d'écho (echo-reply)
    - Type 11 : Temps dépassé (un TTL a expiré)

ARP - *Address Resolution Protocol*

- ARP permet de trouver l'adresse physique (adresse MAC) d'un hôte à partir d'une adresse IP
  - RFC 826
  - En chaque station, ARP maintient un cache ARP
  - A veut émettre une trame Ethernet vers un ordinateur B d'adresse IP *ad-ip-b* :
  - Si, pour *ad-ip-b*, aucune adresse physique n'est indiqué dans le cache ARP
    - alors A diffuse une requête ARP : Qui est *ad-ip-b* ?
    - seul le poste B avec cet adresse répond : je suis à l'adresse *ad-ip-b* et mon **adresse physique est *ad-mac-b***.
    - A mets à jour son cache ARP
  - A peut donc émettre des trames vers l'adresse physique *ad-mac-b* de B.

Les protocoles de routage

- Les protocoles suivant font partis de la couche Internet de l'architecture TCP/IP. Nous les avons déjà décrit

  - RIP (*Routing Information Protocol*)
  - IS-IS (*Intermediate system to intermediate system*)
  - OSPF (*Open Shortest Path First*)
  - BGP (*Border Gateway Protocol*)

Exemple de table de routage

Network destination ND	Netmask M	Gateway	Interface	Metric
0.0.0.0	0.0.0.0	192.168.0.1	192.168.0.100	10
127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.0.1	127.0.0.1	1
192.168.0.0	255.255.255.0	192.168.0.100	192.168.0.100	10
192.168.0.100	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	10
192.168.0.1	255.255.255.255	192.168.0.100	192.168.0.100	10

- *Network destination* et *Netmask* (réseau de destination et masque d'adresse) peuvent être écrit en utilisant la longueur du préfixe :
  - ND = 192.168.0.0 et M = 255.255.255.0 => **192.168.0.0/24**
- Pour savoir si une route ND concorde à une adresse de destination D :
  - **D** ∧ **M == ND** ∧ **M** avec **ND** *Network destination*, **M** *Netmask*
  - Exemple pour 192.168.0.27 :

    192.168.0.27 ∧ **255.255.255.0 == 192.168.0.0** ∧ **255.255.255.0**

Les protocoles de routage

- Plusieurs réseaux de destination (ND) peuvent concorder. Dans ce cas, la meilleure route sera celle où M sera le plus grand (soit **la plus grande longueur** de préfixe).
- Avec cette même table de routage, quelle est la meilleure route pour la destination 192.168.0.100 ?

Network destination ND	Netmask M	Gateway	Interface	Metric
0.0.0.0	0.0.0.0	192.168.0.1	192.168.0.100	10
127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.0.1	127.0.0.1	1
192.168.0.0	255.255.255.0	192.168.0.100	192.168.0.100	10
192.168.0.100	255.255.255.255	127.0.0.1	127.0.0.1	10
192.168.0.1	255.255.255.255	192.168.0.100	192.168.0.100	10