



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.



Le contrôle physique du circuit de données

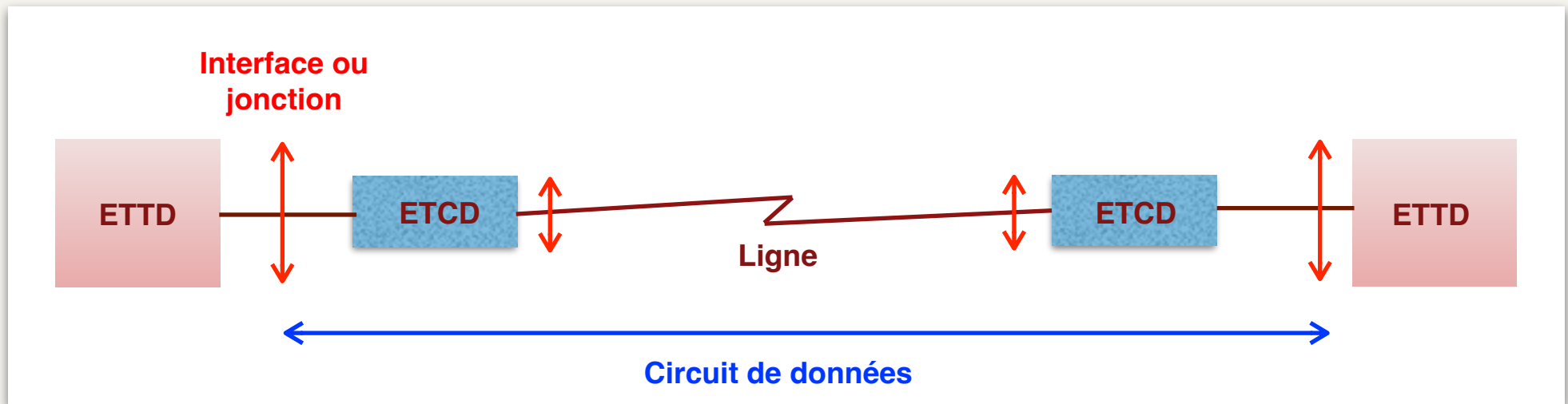


Fig 2.1 - Le circuit de données

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

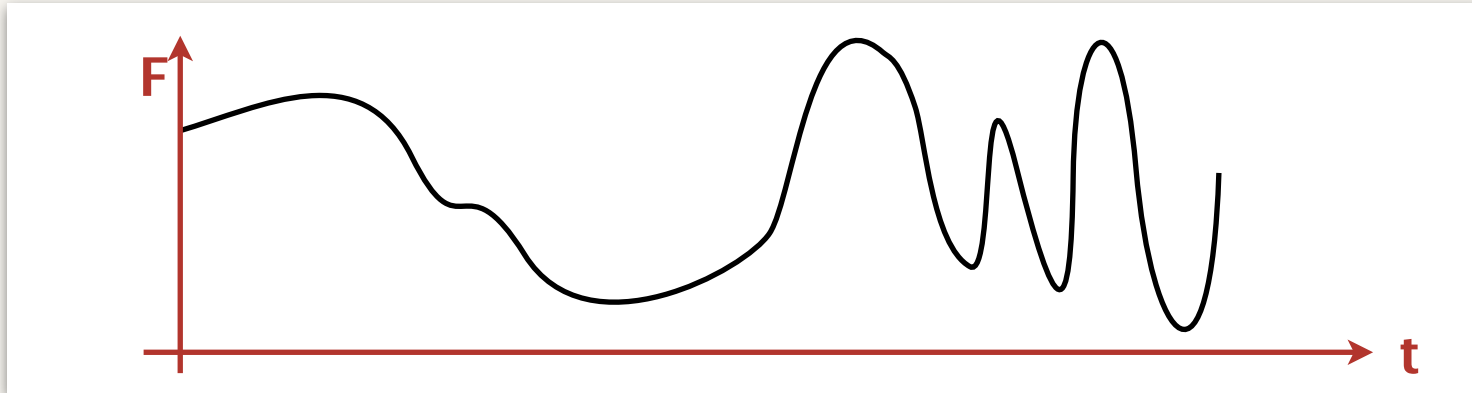
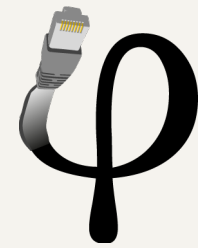


Fig 2.2 - variation continu de F en fonction du temps

Information numérique

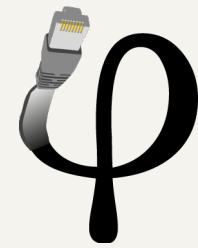
- Elle résulte :
 - d'une source discontinue (ou discrète) ;
 - où les variables ne peuvent avoir qu'un nombre fini de valeurs
 - de l'assemblage d'éléments indépendants (alphabet...)
 - de la numérisation d'une information analogique
 - (=> échantillonnage, quantification et codage)



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

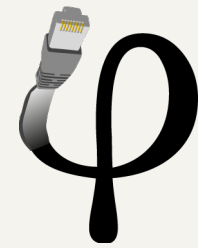
T : durée d'émission

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
```

RTT

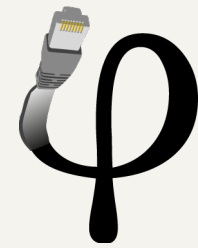


RTT moyenne



écart type RTT





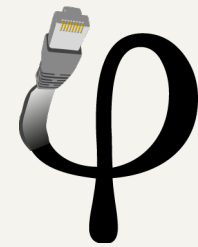
Définitions

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



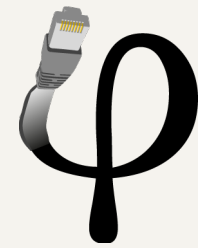
Définitions

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 transmis sans adaptation sur une ligne de transmission



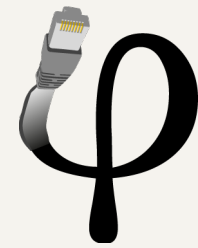
Fig 2.4. - Codage en ligne

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

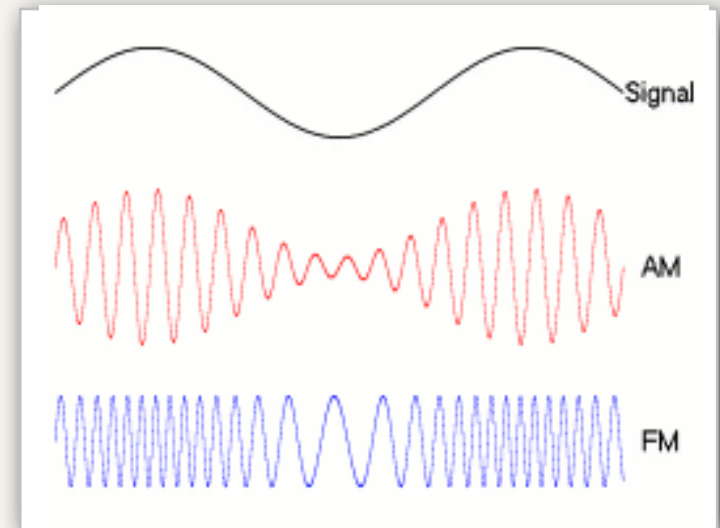


Fig 2.5 - Modulation AM et FM

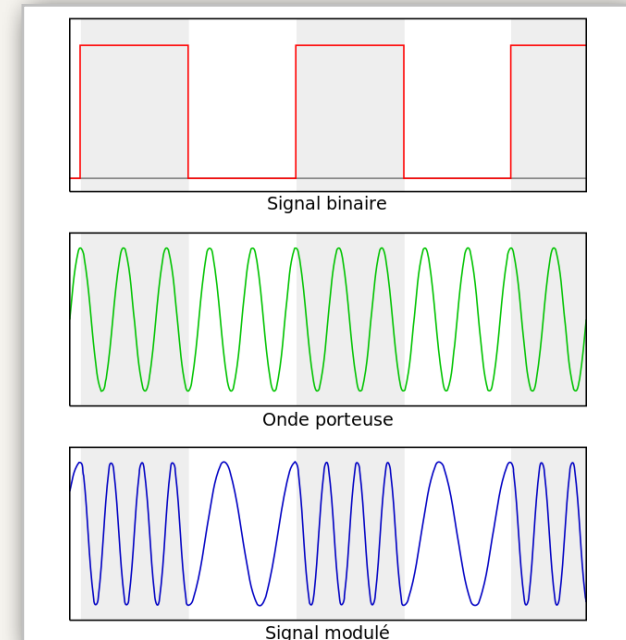


Fig 2.6 - Modulation de fréquence



La modulation

Modulation d'amplitude

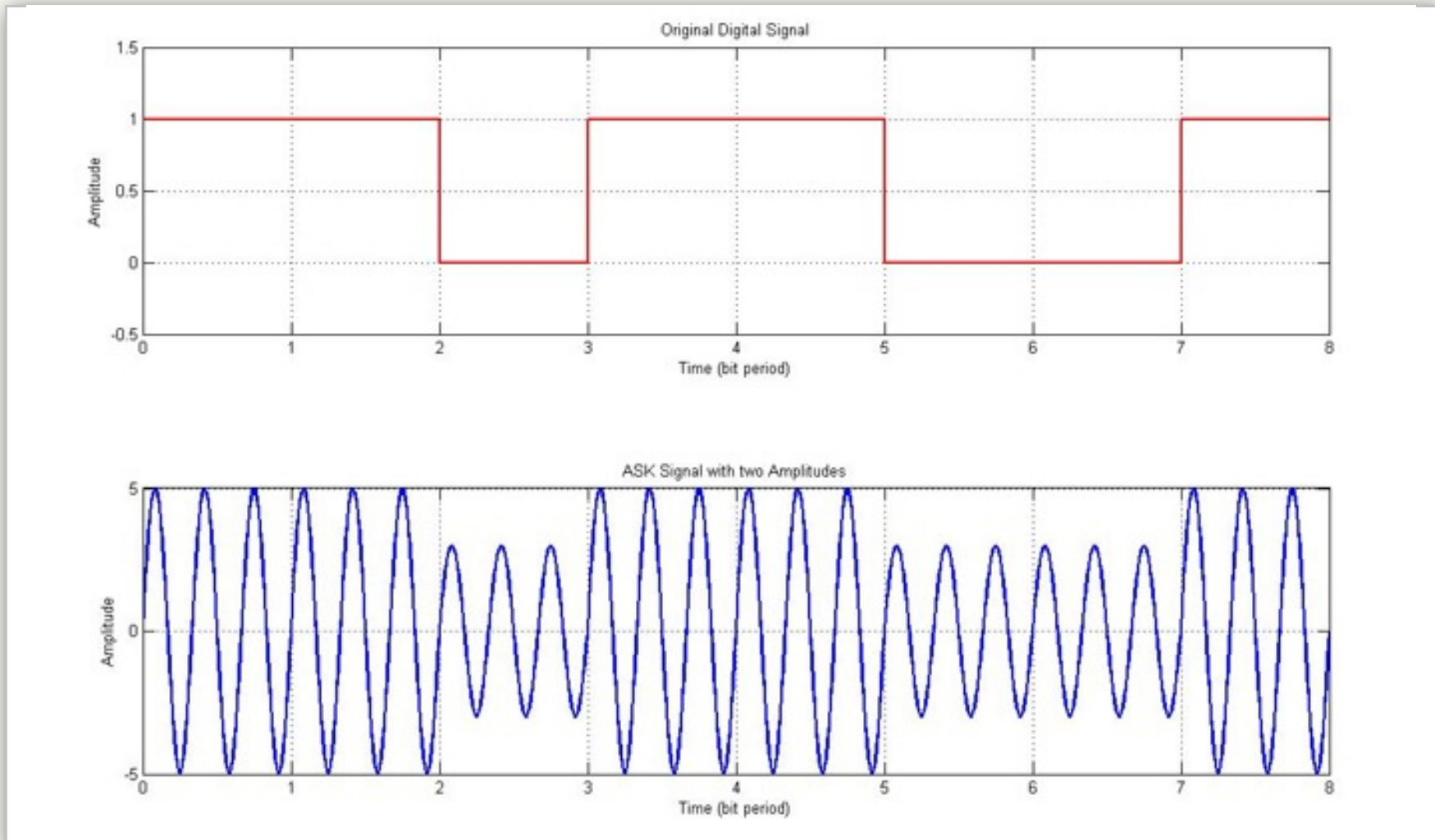
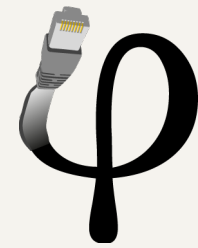


Fig 2.7 - Modulation d'amplitude



La modulation

Modulation de fréquence

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

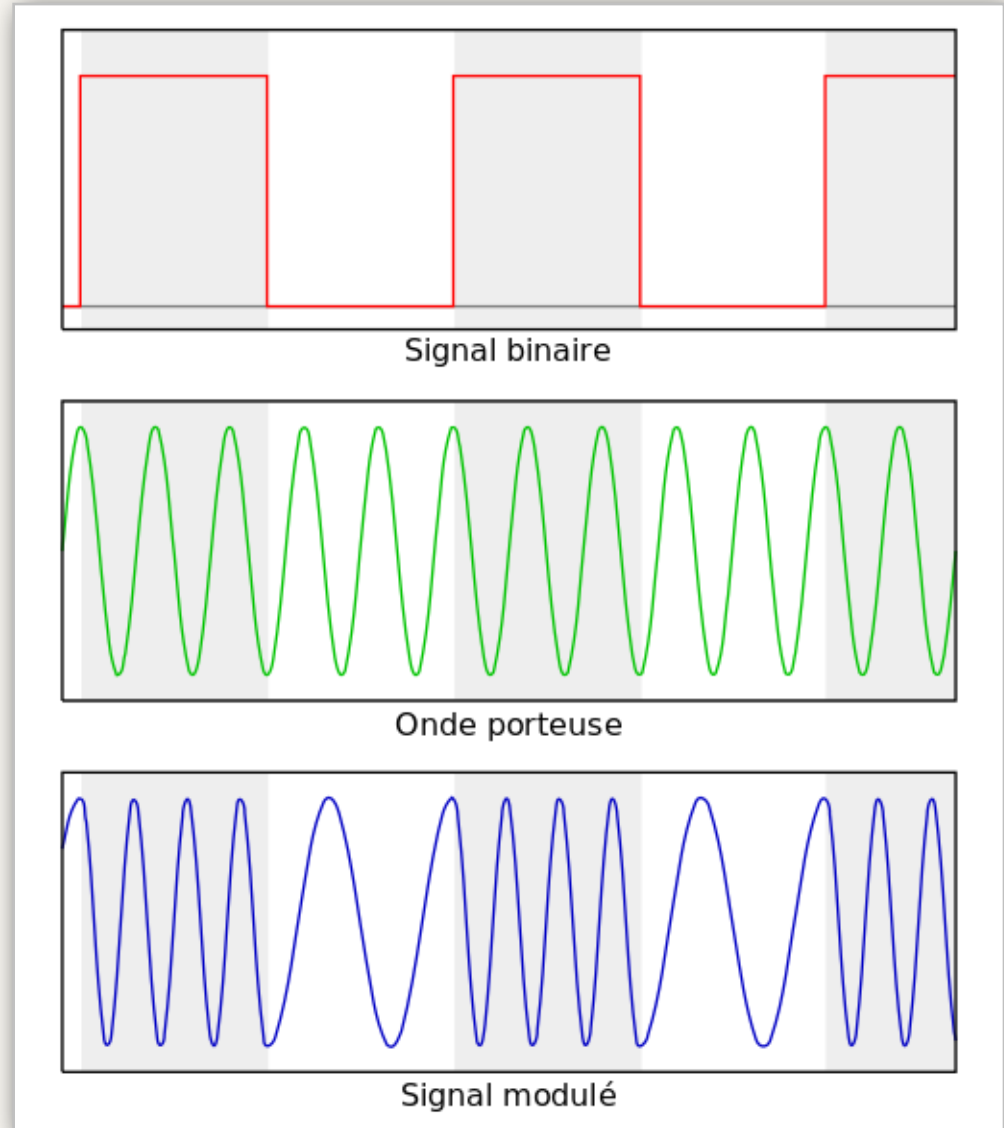


Fig 2.8 - Modulation de fréquence



La modulation

Modulation d'amplitude en quadrature

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

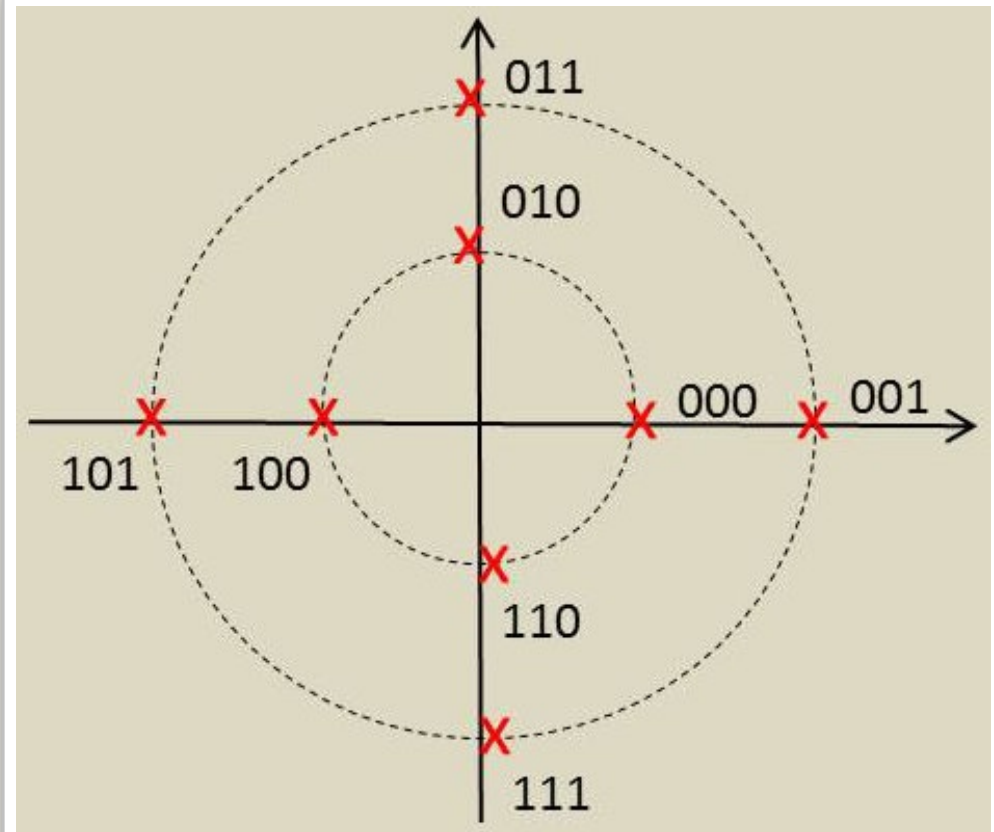
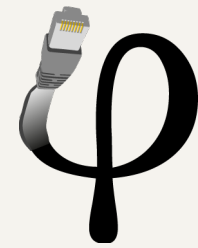


Diagramme de constellation
QAM à 8 états

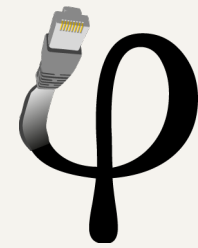
Fig 2.9 - Modulation d'amplitude en quadrature



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 :

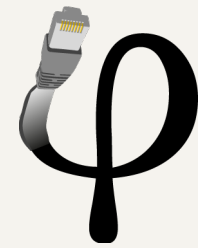
- La fréquence d'échantillonnage $F_{\text{éch}}$ doit être en rapport avec F_{max} , la plus grande fréquence du signal à convertir :
- $F_{\text{éch}} \geq 2 F_{\text{max}}$

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) :
- $S/N_{\text{db}} = 10 \log_{10} (P_S / P_N)$
 - Exemple : $P_S / P_N = 100 \Rightarrow S/N_{\text{db}} = 20 \text{ dB}$

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.

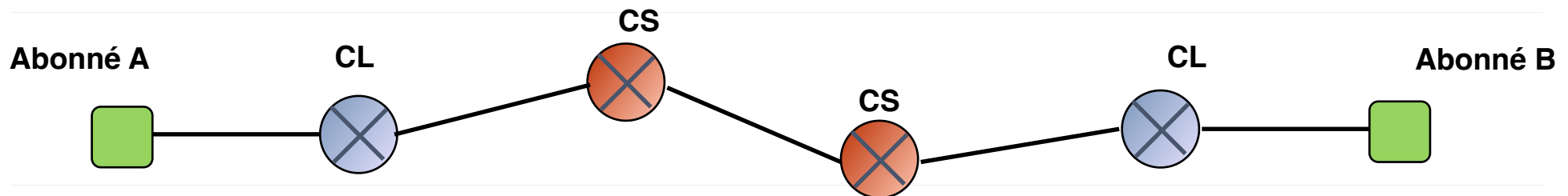


Fig 2.12 - Liaison téléphonique entre 2 abonnés



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**

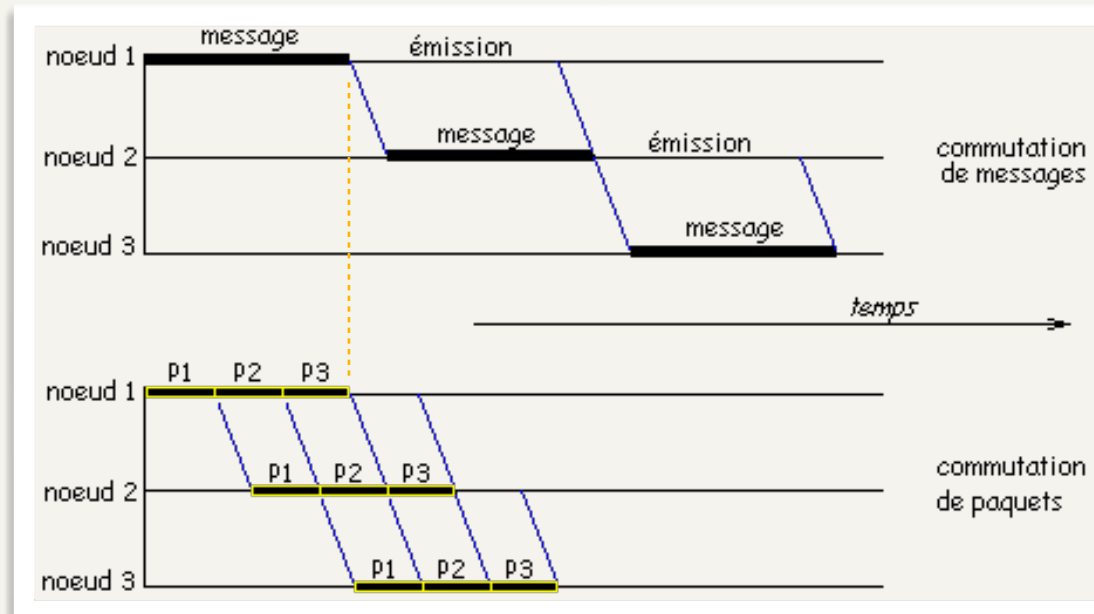
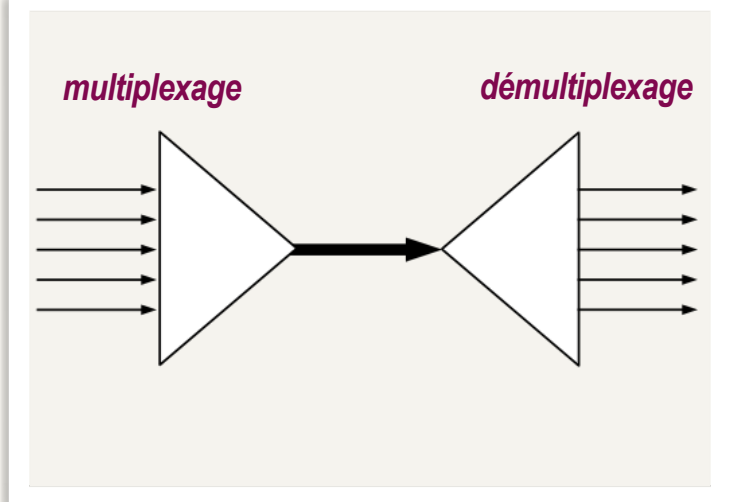


Fig 2.14 - Commutation de messages vs commutation de paquets



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

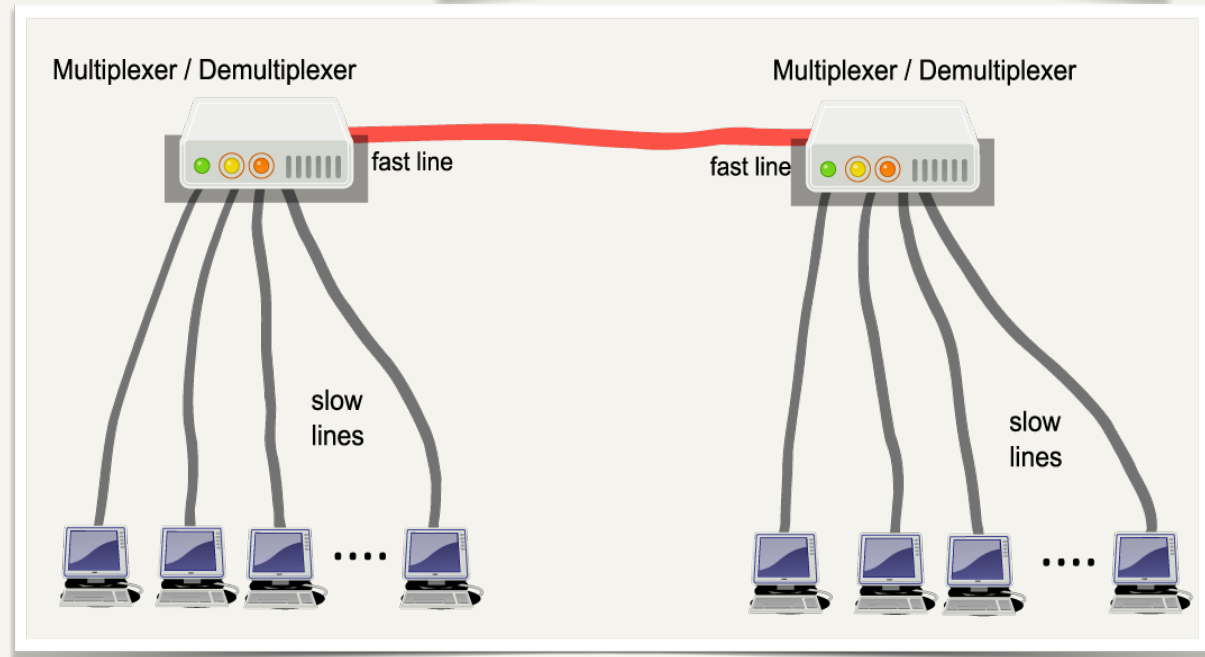


Fig 2.15. - Multiplexage



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

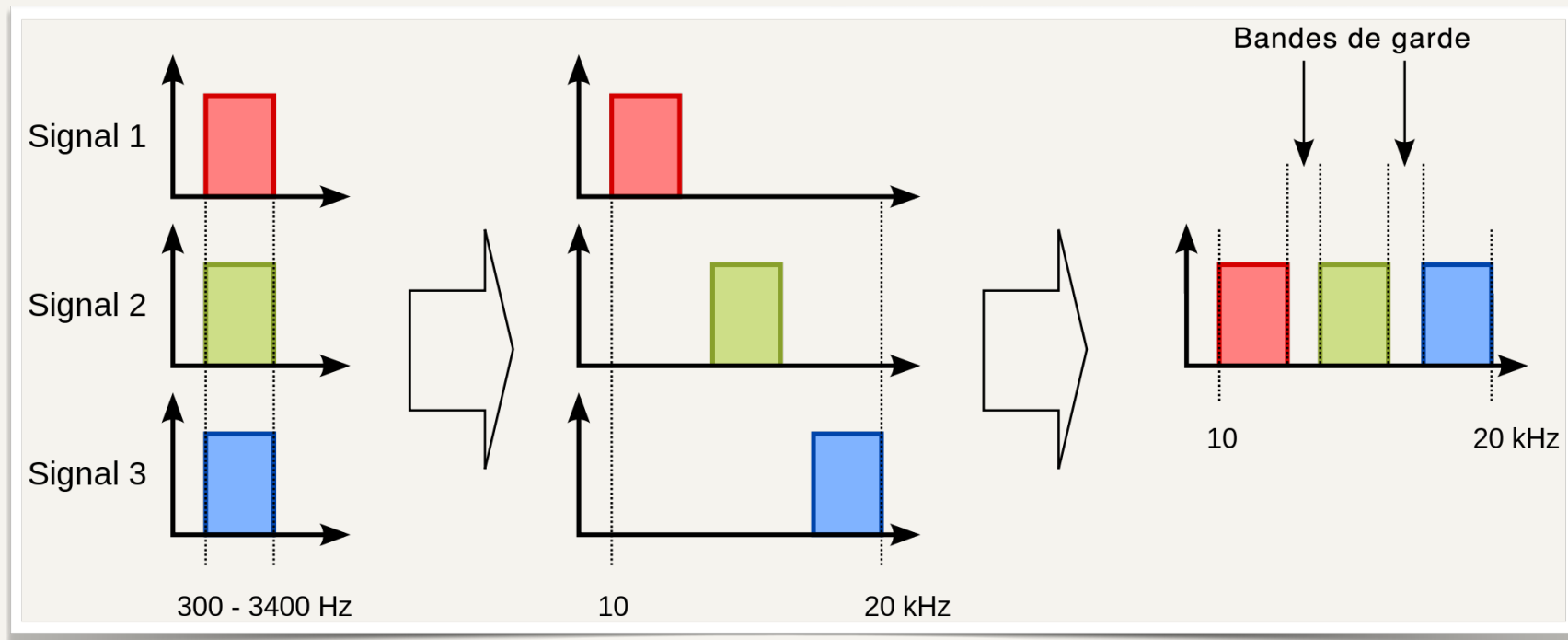


Fig 2.16. - Multiplexage fréquentiel



Multiplexage fréquentiel ; FDM

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

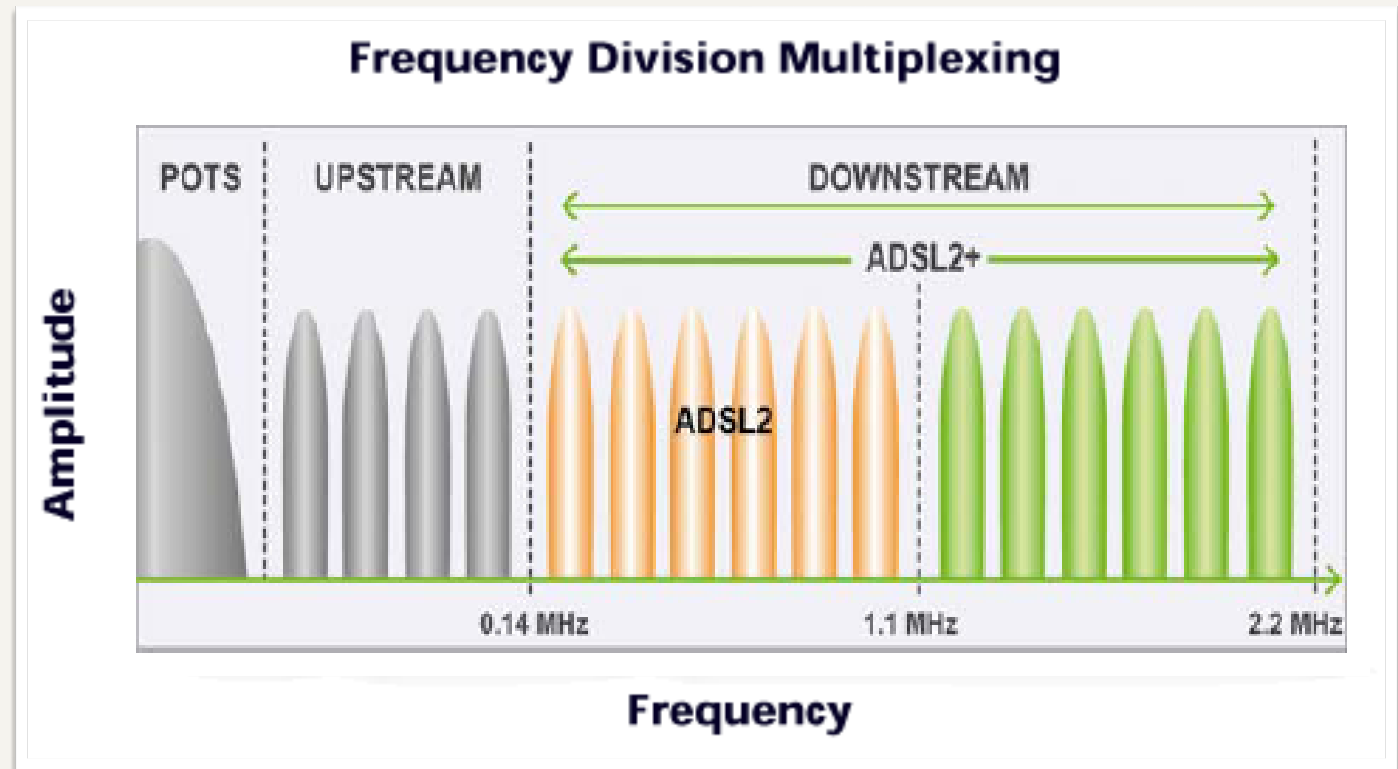


Fig 2.17. - ADSL



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.

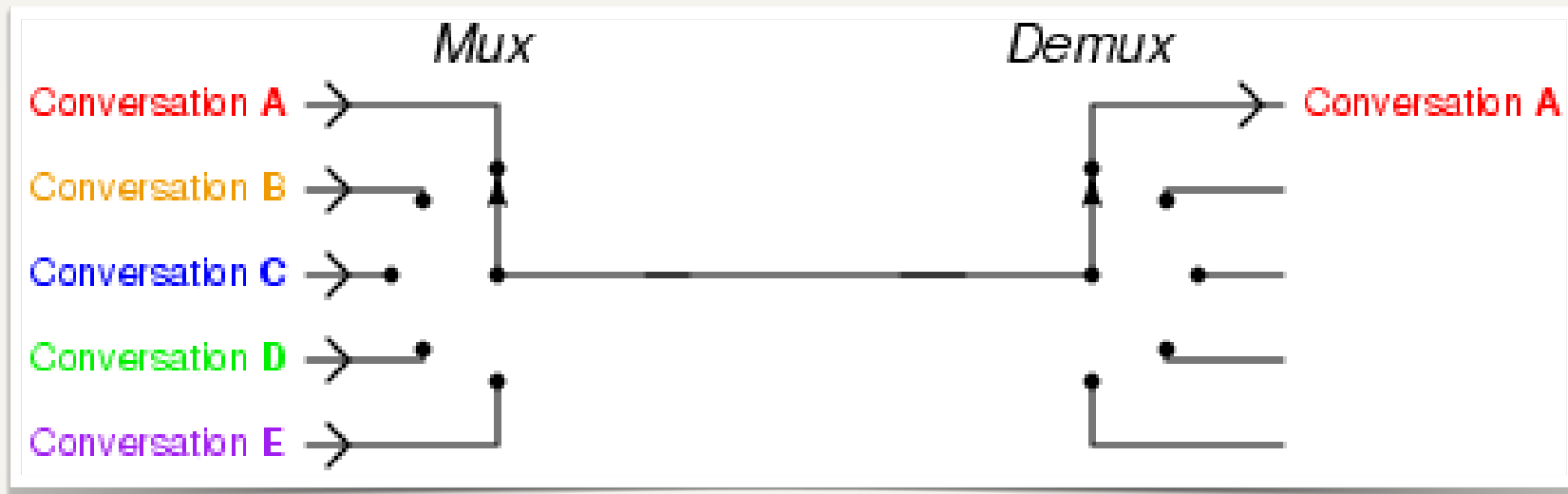
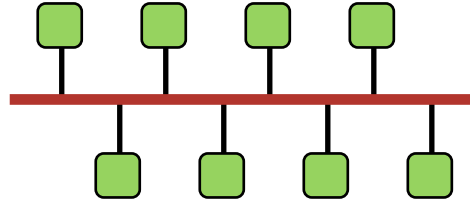


Fig 2.18. - Multiplexage temporel

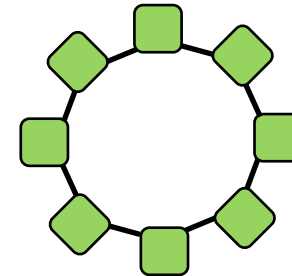


Topologie physique ou topologie logique

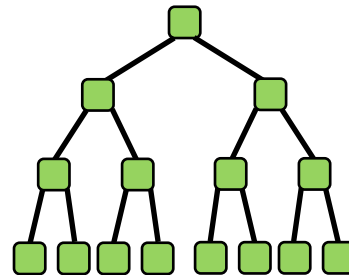
❖ Bus



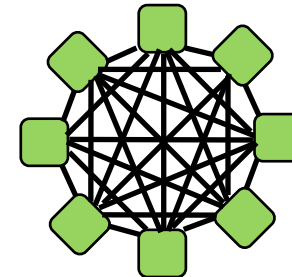
❖ Anneau



❖ Arbre



❖ Réseau maillé



❖ Étoile

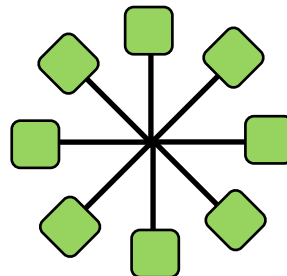
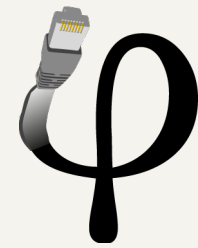
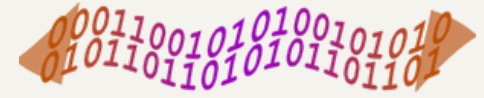


Fig 2.19 - Différentes topologies



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 frame - *Data Link layer*

- ▶ Transfert de **frames** entre deux systèmes adjacents
- ▶ Établissement, maintien, 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

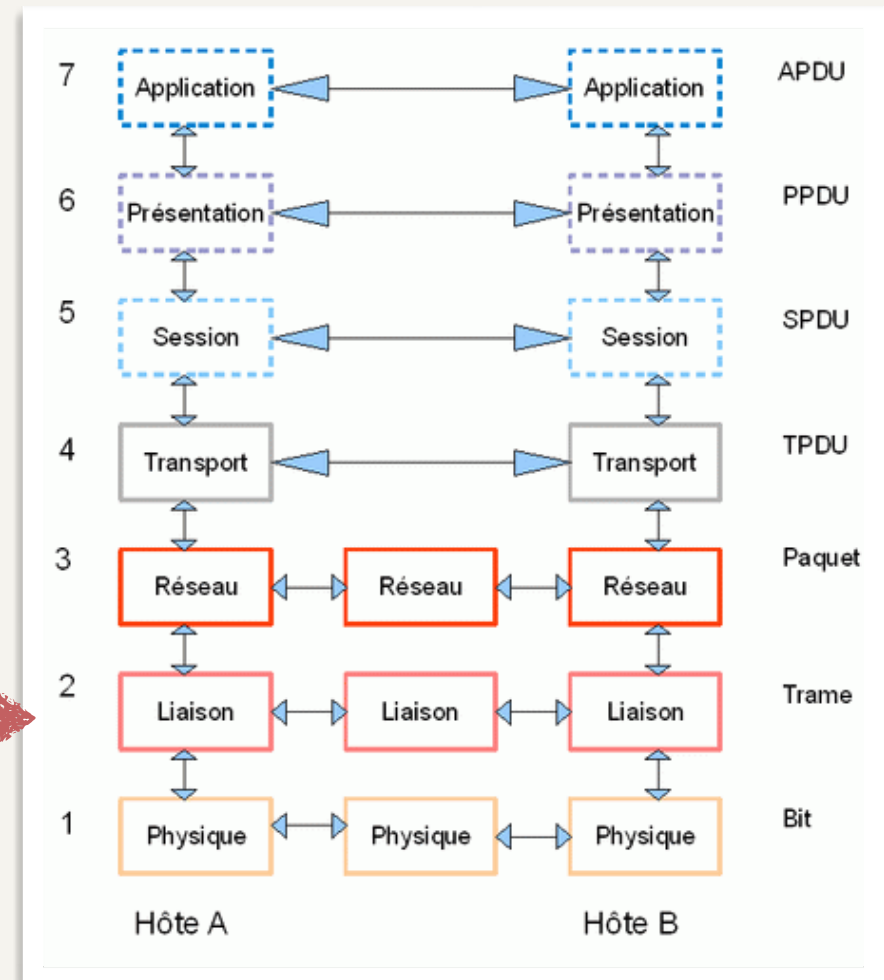
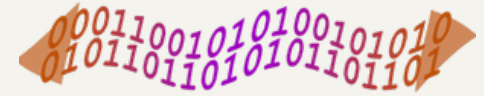


Fig 3.1 - Le modèle OSI



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.

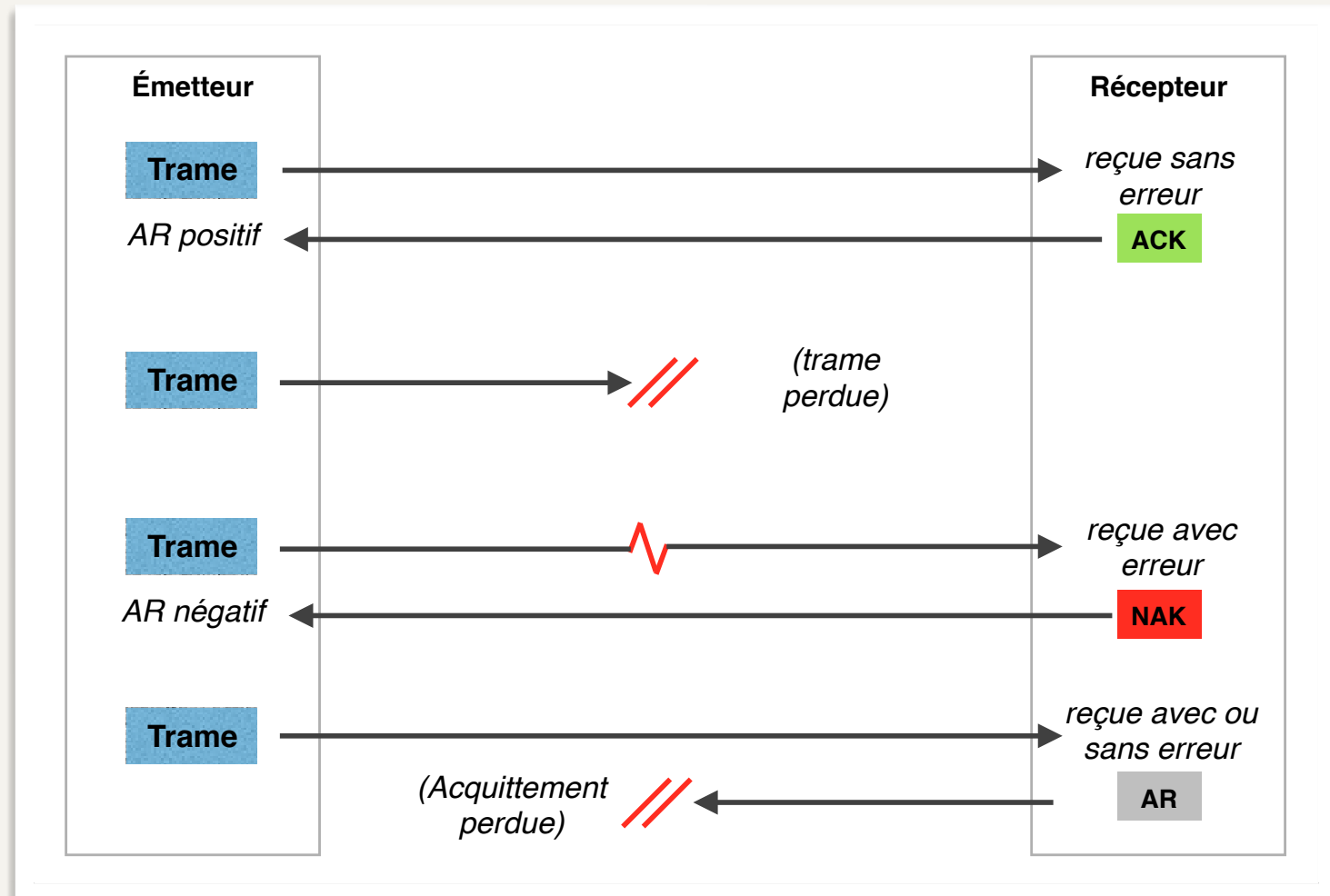
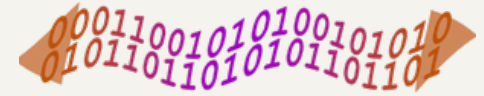


Fig 3.2 - Scénarios pour des transmissions de trames et acquittements



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 reconnaître 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
- 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
 - reconnaît et retire les fanions « **01111110** » ;
 - il remplace les séquences « **111110** » par « **11111** ».

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

3 - Détection des erreurs

Types d'erreur et type de code

Erreur par rafale :

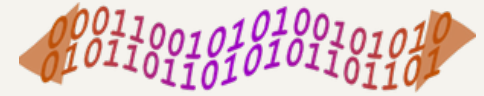
- entre 2 bits erronés, 0 à plusieurs bits sont erronés

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 $D_h = E + 1 \Rightarrow E = D_h - 1 = 1$

3 - Détection des erreurs

Code de contrôle de parité

On distingue

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

▸ Ex.

VRC (parité paire)

1	0	1	0	0	0	1	1
0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	0

→ nb pair de 1

LRC :

0	1	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

↵ nb pair de 1

3 - Détection des erreurs

Code de contrôle de parité

On distingue

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

▸ Ex.

VRC (parité paire)

1	0	1	0	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	0

→ nb impair de 1

LRC :

0	1	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---



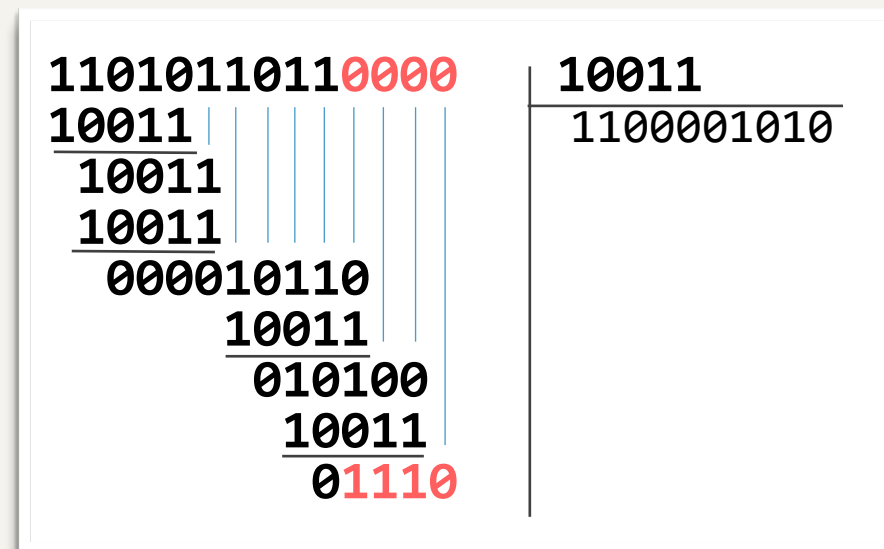
nb impair de 1

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 $M \cdot R = T$ 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



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

Fig 3.3 - Division pour le calcul du CRC

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*)

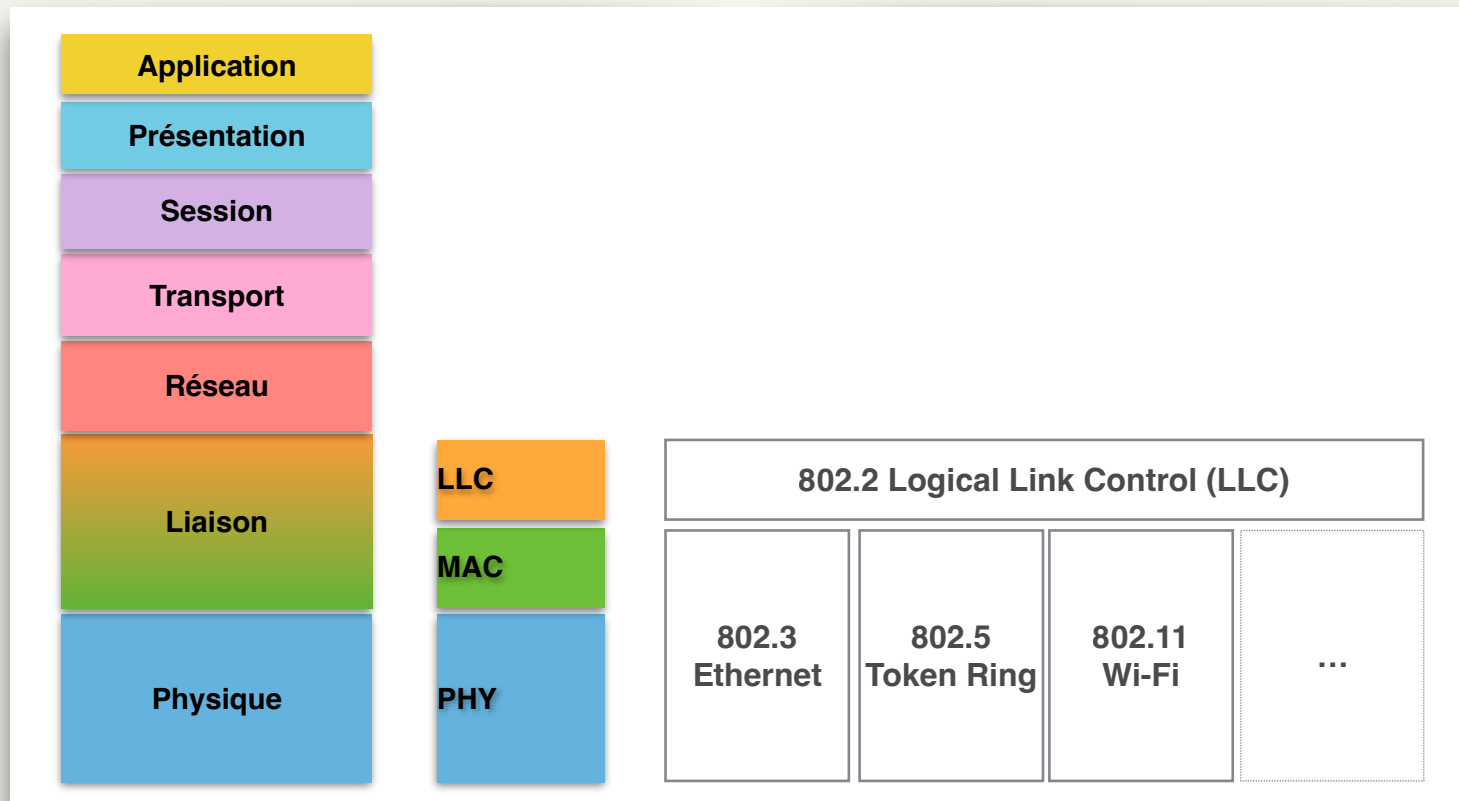


Fig 3.5 - Couches PHY, MAC et LLC

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*)

4 - La sous-couche MAC

L'adressage MAC

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

Elle est gravée par le fabricant 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 fabricant
- On exprime en général une adresse MAC avec 6 octets notés en hexadécimal, séparés par « : »

00:AA:00:9B:27:CC

OUI d'Intel

SN

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 collisions)
- *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*

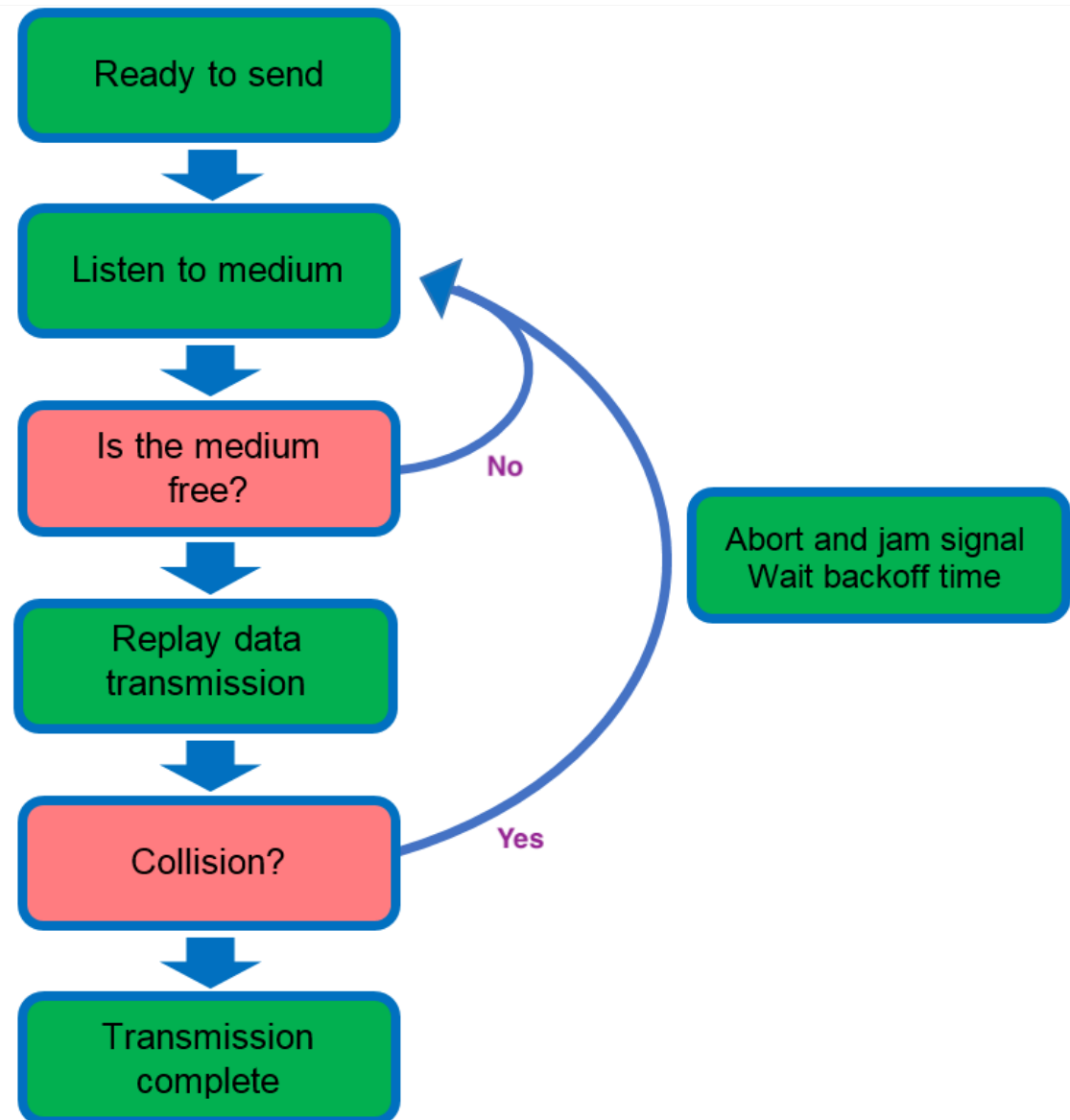


Fig 3.7 - Principe du CSMA/CD

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

4 - La sous-couche MAC

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

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

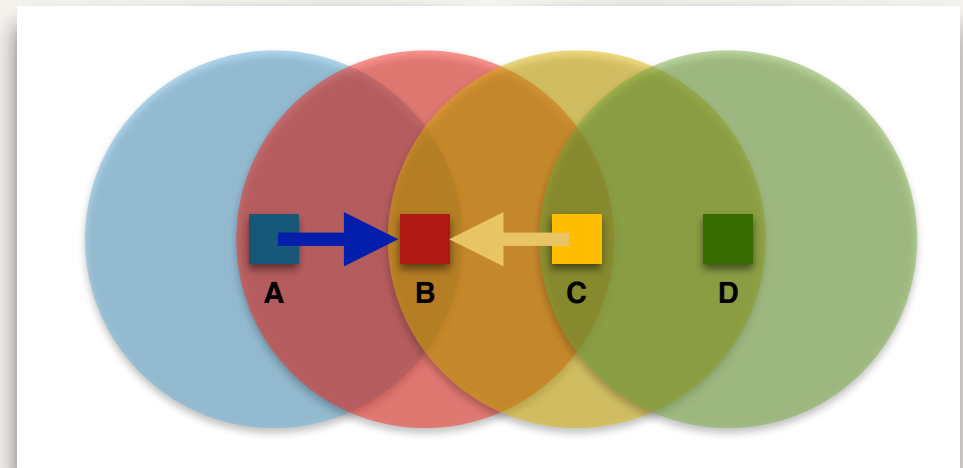


Fig 3.9 - problèmes de la station cachée

4 - La sous-couche MAC

Protocole de LAN sans fil

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

- Lorsque la station B veut envoyer une frame T vers C,
 - elle envoie d'abord une mini frame RTS (*Request to Send*) = « demande d'émission », indiquant la longueur de la frame T qui va suivre
 - C répond à B avec CTS (*Clear to Send*) = « prêt à l'émission », encore avec la longueur de la frame 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*)

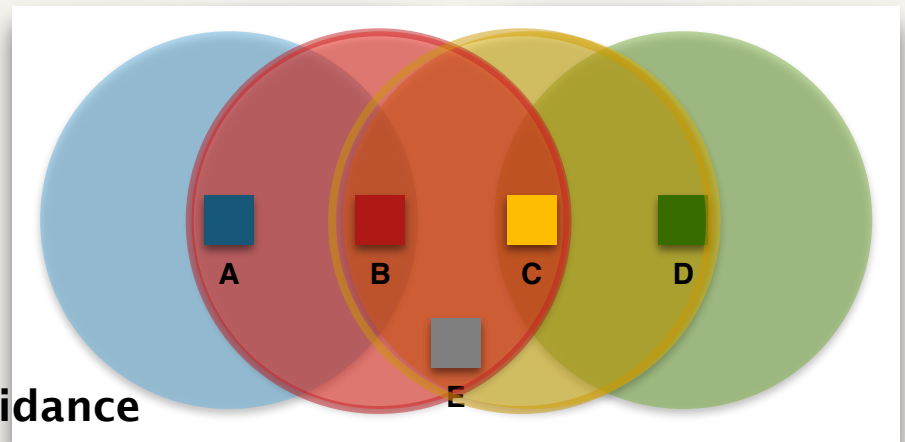
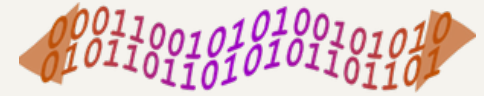


Fig 3.10 - Multiple Access with Collision Avoidance



4 - La sous-couche MAC

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 certains 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**

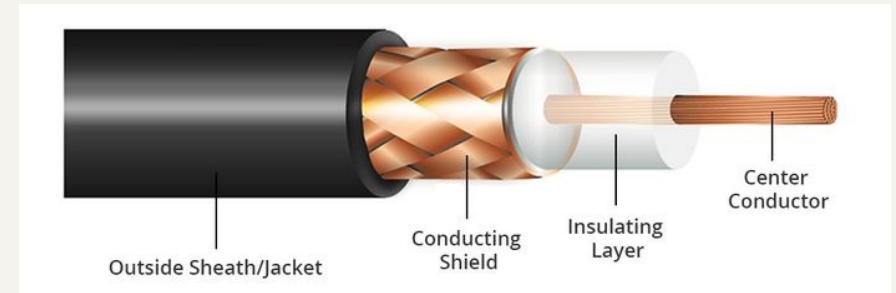


Fig 3.12 - Câble coaxial

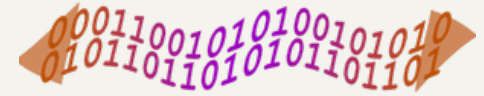
Ethernet a beaucoup évolué avec l'utilisation de la **paire torsadée**

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



Fig 3.13 - Câble à paires torsadées

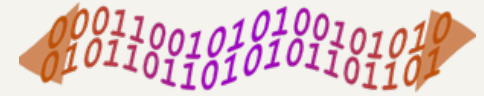
- **10BaseT**
 - 10 Mbit/s, **codage en bande de base** (Manchester)
 - T => **Twisted pair** ; une paire pour l'émission, une pour la réception
 - Topologie en étoile autour d'un **concentrateur (hub)**
 - Liaison point à point entre station et hub ; 100 m maximum
 - Connecteur **RJ45**
 - 3 niveaux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

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

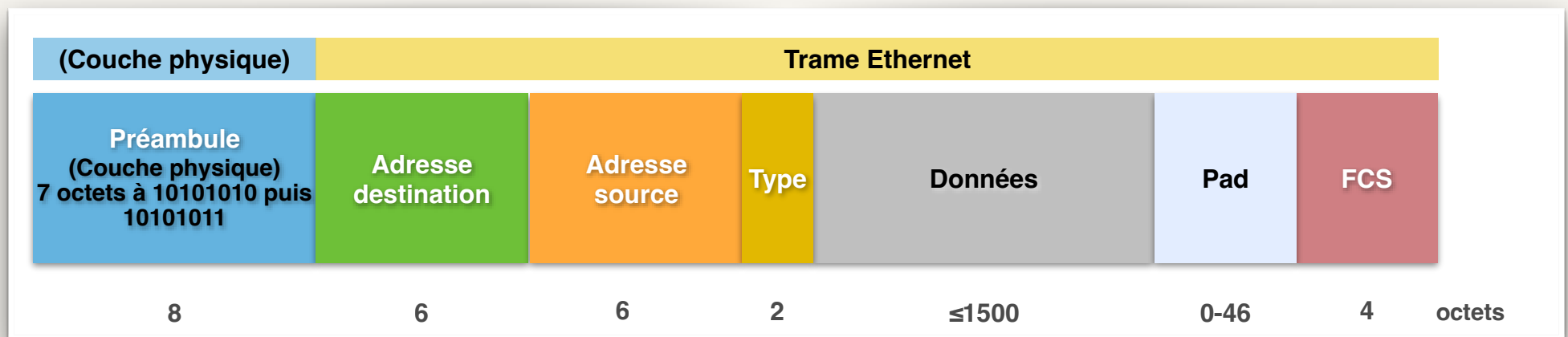
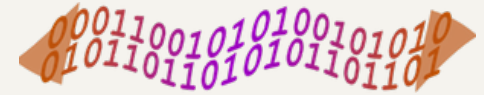


Fig 3.14 - Trame Ethernet V2



4 - La sous-couche MAC

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 1^{er})
 - ▶ 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*



4 - La sous-couche MAC

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

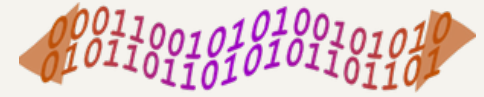


Les normes IEEE 802.11 - couche MAC :

- 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 réglementations 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 ; Virtual 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.