

Niveau Liaison



RÉSEAUX LOCAUX “LAN, Local Area Networks”

Introduction

1 Réseaux locaux partagés

2 Réseaux locaux commutés.

Conclusion

Introduction: caractéristiques communes des réseaux locaux

- Un réseau local dessert un **ensemble** de stations.
- Problème principal posé => **accès multiple**.
- Selon des protocoles situés aux **niveaux physique et liaison**.
- Un réseau local ne dessert **qu'une organisation** correspondant à un domaine privé. Il échappe généralement aux contraintes d'un opérateur de télécommunications
=> Notion de **réseau local d'entreprise ou de réseau local domestique**
- Problème induit par les réseaux locaux: **l'interconnexion des réseaux locaux.**

Caractéristiques techniques communes des réseaux locaux

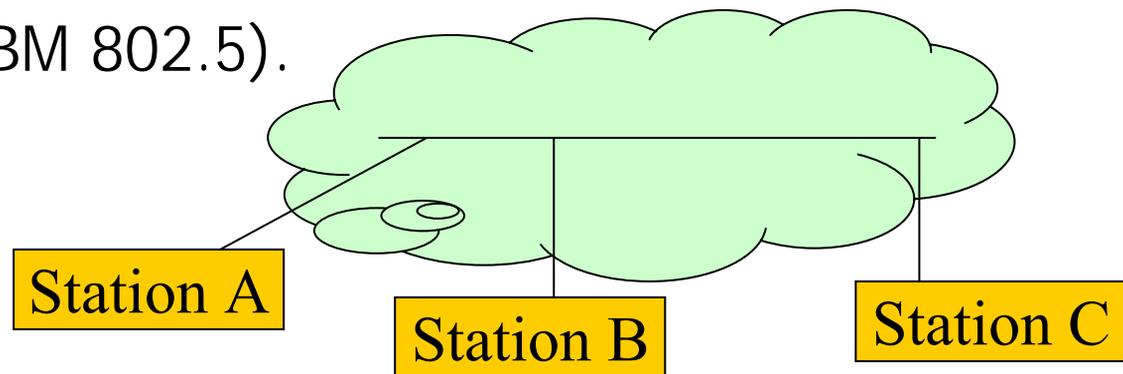
- 1) Le diamètre de la surface desservie **dépend de la technologie adoptée**: il n'excède pas généralement pas **quelques kilomètres**.
- 2) Le débit binaire nominal est au minimum mesuré en **dizaines de mégabits par seconde** (jusqu'à 10 gigabits/s) avec des **taux d'erreurs faibles**.
- 3) **Normalisation** : IEEE 8.02 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - ISO 8802.

Les deux méthodes de réalisation :

a) Réseaux locaux partagés 'shared'

■ 1) Utilisation d'une voie commune multipoint

- Bus série (Ethernet IEEE 802.3).
- Bande de fréquence hertzienne (WIFI 802.11).
- Boucle (IBM 802.5).



■ 2) Partage de la voie commune multipoint:

le problème du contrôle de l'accès au médium (MAC "Médium Access Control") consiste à déterminer la station qui, à un instant donné, a le droit d'émettre.

Les deux méthodes de réalisation :

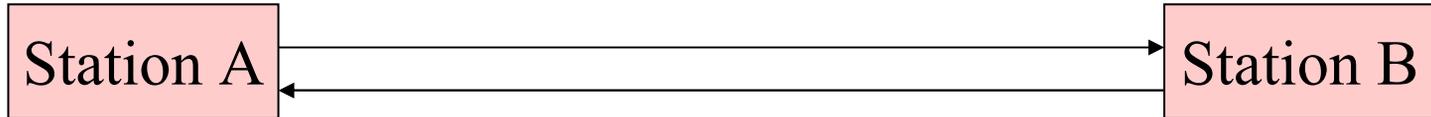
b) Réseaux locaux commutés 'switched'

- 1) **Utilisation de techniques de commutation** pour faire communiquer des stations au niveau liaison (niveau 2).
- 2) Exemples de techniques de commutation employées :
 - Commutation **temporelle asynchrone** (à mémoire partagée, à médium partagé).
 - Commutation **spatiale** (matrices d'aiguillages).
- 3) Pour des raisons de compatibilité, les réseaux locaux commutés offrent , **les mêmes méthodes d'accès, l'adressage, les mêmes formats de trames** que les réseaux partagés => possibilité de mixage des approches partagées et commutées.

Réseaux locaux partagés: mode de fonctionnement ' half duplex '

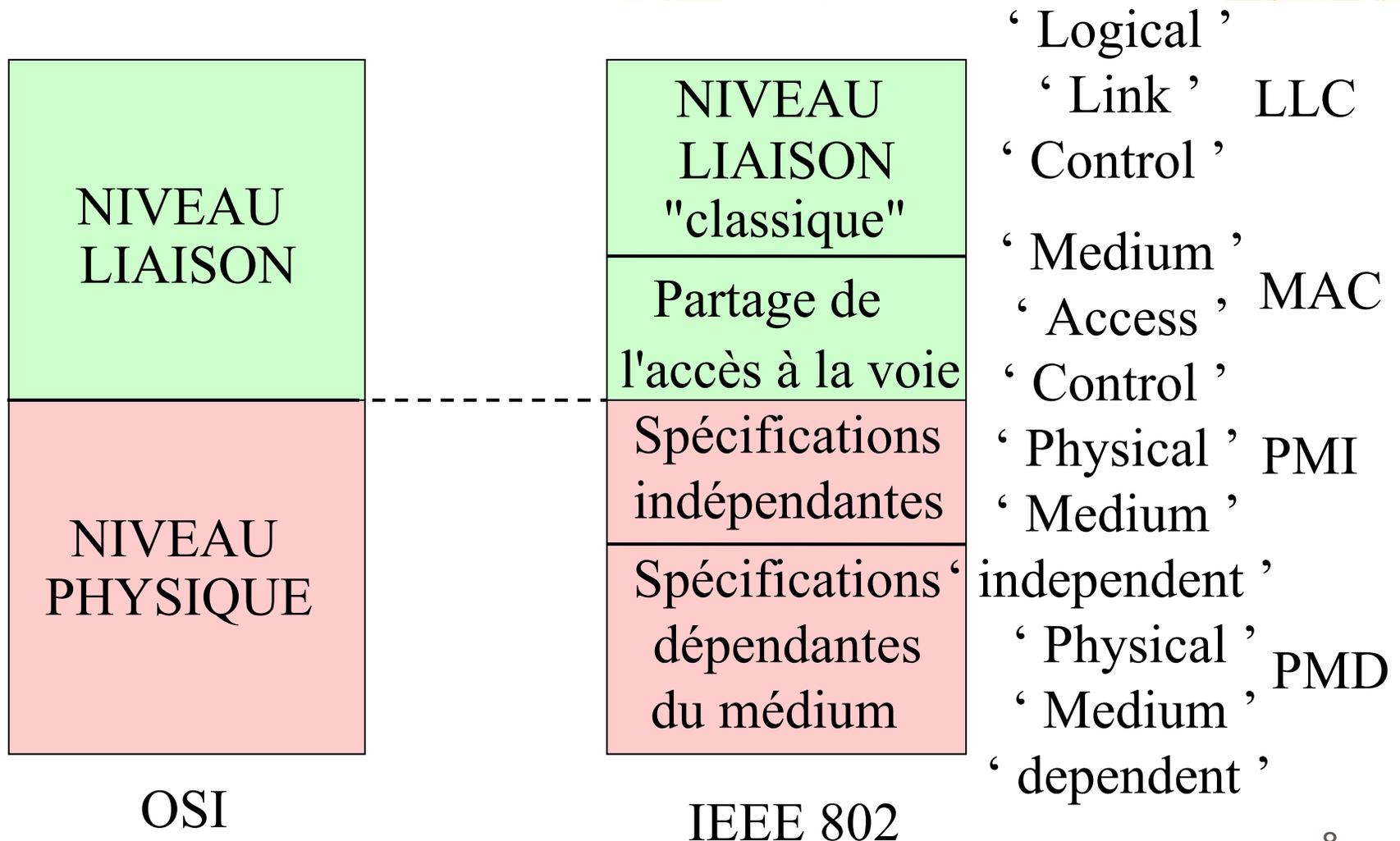
- Existence d'une voie unique de communication partagée
 - **Une seule** station peut émettre à un instant donné
 - Vers **un ou plusieurs destinataires** (médium à diffusion)
 - Mode de communication demi-duplex: **half duplex**.
- Limitation du **débit de transmission** de l'ensemble des stations au **débit du médium partagé**.
- **Contraintes de distances** liées au médium, au codage des données et au protocole de partage.

Réseaux locaux commutés: mode bidirectionnel (' full duplex ')



- Connexion directe entre deux stations ou entre une station et un commutateur (câblage en étoile)
 - Une seule station connectée => pas de partage de voie commune.
 - Une station peut **émettre** à un instant donné vers le commutateur et **recevoir** en même temps.
 - Mode de communication **bidirectionnel simultané (full duplex)** possible.
- Possibilité de **parallélisme** : débit plus important.
- Moins de contraintes de distance.

Découpage en couches lié aux réseaux locaux IEEE 802



Réseaux locaux



Réseaux locaux partagés

- 1 Critères de classification des méthodes de partages.
- 2 Réseaux en compétition.
- 3 Réseaux Ethernet.
- 4 Réseaux WIFI.

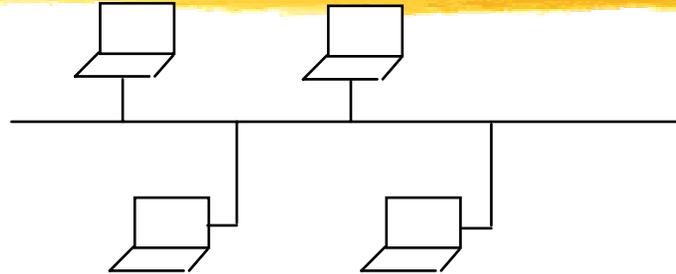
Réseaux locaux partagés



Critères de classification des réseaux locaux partagés

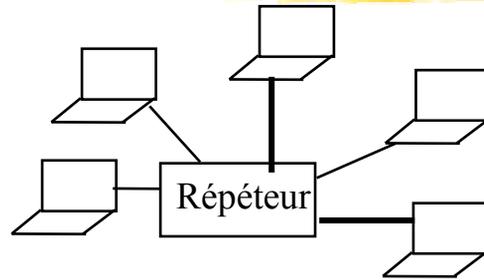
- Critères qualitatifs
- Critères de performance
- Critères de sûreté de fonctionnement

Critères qualitatifs : Topologie Bus ou voie hertzienne



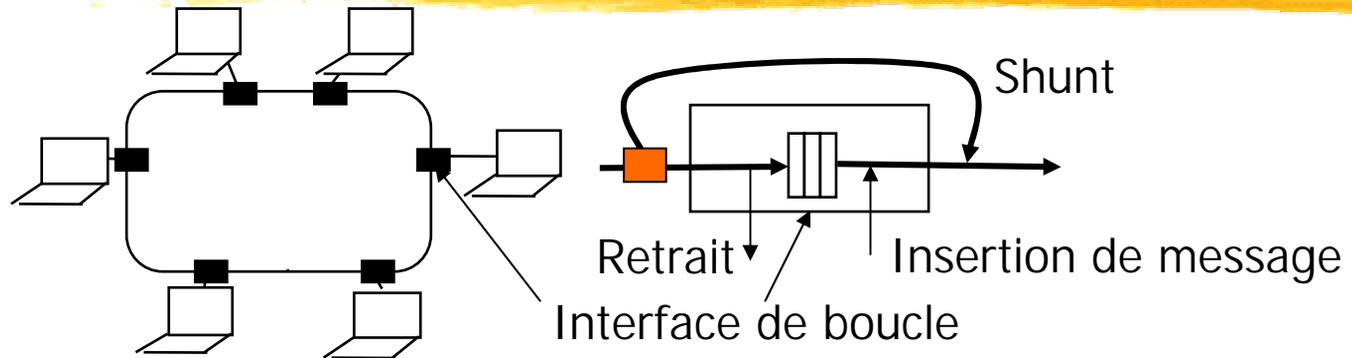
- Chaque station est **directement reliée aux autres par un canal unique** de communication (bus série coaxial ou voie hertzienne).
- Un message véhiculé par le canal **peut-être reçu par toutes les stations**: diffusion très facile à réaliser mais notion de promiscuité 'promiscuous mode' => problèmes de sécurité.
- Une station vérifie, **d'après l'adresse contenue dans le message**, si le message lui est destiné.
- **Médium passif** : électronique plus simple, moins de pannes.
- **La bande passante** de la voie limite les performances.
- **Exemples: Ethernet** (sur câble), **WIFI** (sans fil).

Critères qualitatifs : Topologie Étoile



- Un concentrateur (un 'hub') **relie les stations**.
- Un concentrateur est un répéteur de signal: "**Repeater Hub**".
- Les répéteurs peuvent être **interconnectés** (arbre).
- Le câblage en étoile permet de **découpler chaque station du reste du réseau**.
- Problème de la **fiabilité** du répéteur: électronique active.
- **Exemple: répéteur Ethernet**.
- **Le câblage type** en matière de réseaux locaux partagés.

Critères qualitatifs : Topologie Boucles ou Anneaux (1)



- Les stations sont rattachées au moyen **d'interfaces** selon **une topologie en boucle**.
- Une interface de boucle retarde le message dans un registre et régénère le signal.
- Un message envoyé par une station **fait un tour complet** et est **retiré par son émetteur**.
- L'**adresse destinataire** permet de déterminer si une interface donnée doit prélever le message ou non.

Critères qualitatifs : Topologie

Boucles ou Anneaux (2)

- On doit définir la **politique de partage de la boucle**:
 - **Plateau tournant** (' Slotted ring ' J.R. Pierce)
 - **Jeton circulant** (' Token ring ' E.E. Newhall).
- Un anneau est **une structure active**, (régénération de signal/retard dans les stations).
 - **Problèmes de fiabilité** dus aux interfaces
 - Nécessité de **prévoir le retrait** ("shunt") de stations sur panne.
- **Exemples** : Boucle à jeton ' Token Ring ' IBM 802.5 ,
Boucle ' FDDI ' ANSI X3T9

Critères qualitatifs : partage en coopération

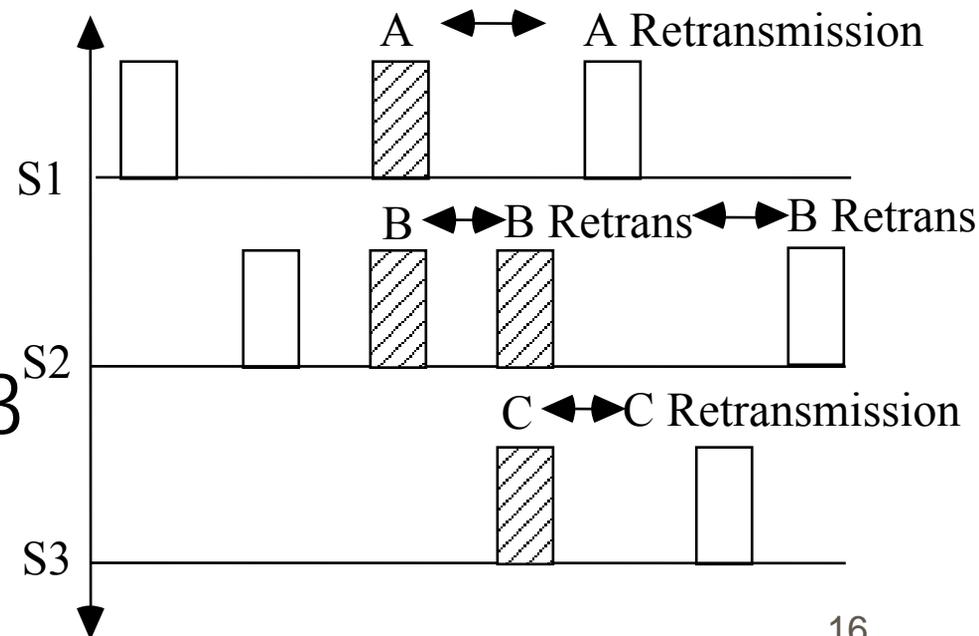
- **Une approche classique.**
 - Les stations **coopèrent** et par un dialogue préalable définissent qui peut accéder à la voie.
- Implique peu ou prou une **connaissance globale**.
- Exemples de **protocoles en coopération**:
 - **Passation de jeton** : Bus à jeton (802.4), Boucle à jeton (802.5), FDDI (X3T9).
 - **Scrutation** (' polling ') : 100 Base VG Anylan, bus de terrain.
 - **Réservation statique** d'intervalles temporels (TDMA: 'Time division Multiplexing Access').

Critères qualitatifs : partage en compétition ('contention')

- Une approche **probabiliste**.
 - Les stations s'emparent de la voie **sans certitude sur son inoccupation**.
 - Il y a nécessairement des **collisions** d'accès à la voie.

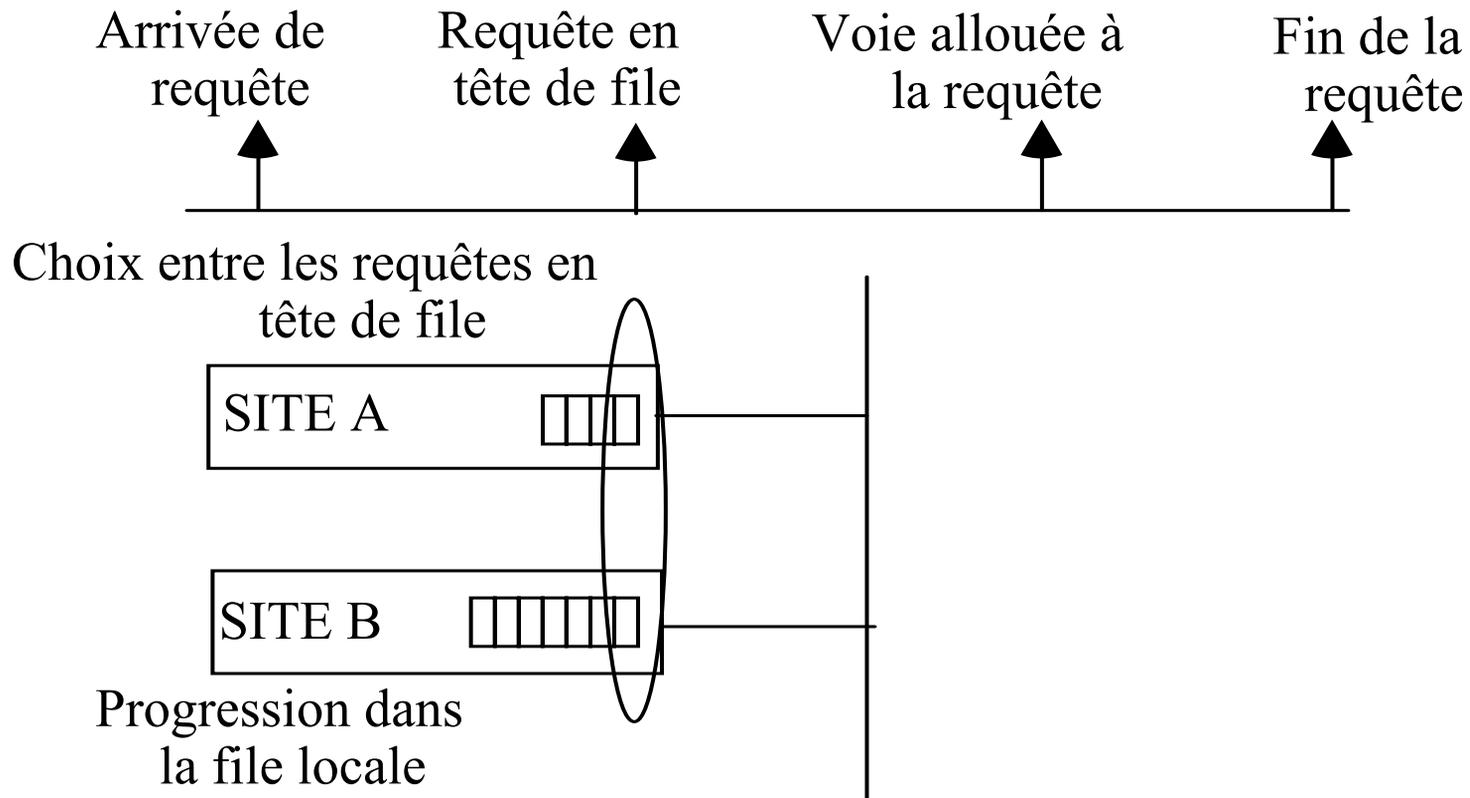
■ Connaissances **locales**

■ Ex: **Ethernet 802.3**
WIFI 802.11.



Critères de performances

- Réseau local => Ajout d'une attente de plus : le temps d'accès à la voie commune (au médium).



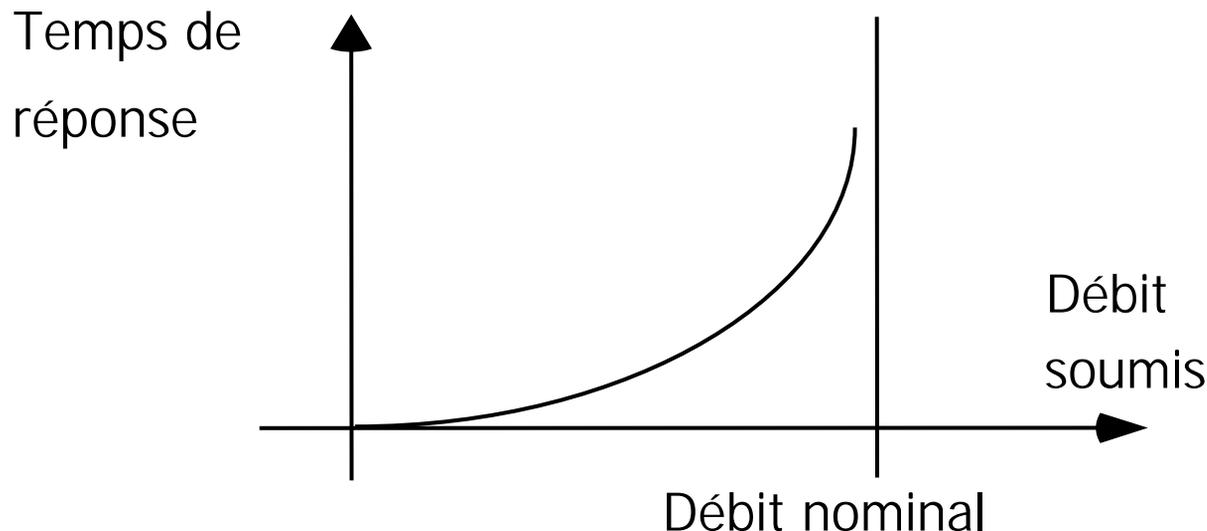
Critères de performances : Point de vue de l'utilisateur

■ Qualité de service temporelle (QOS)

- Temps de réponse / latence (moyenne), **gigue** (second moment)
- **Équité des services** ou garantie d'un niveau de service.

■ Si l'on soumet une voie à un trafic de plus en plus élevé : phénomène de **congestion**.

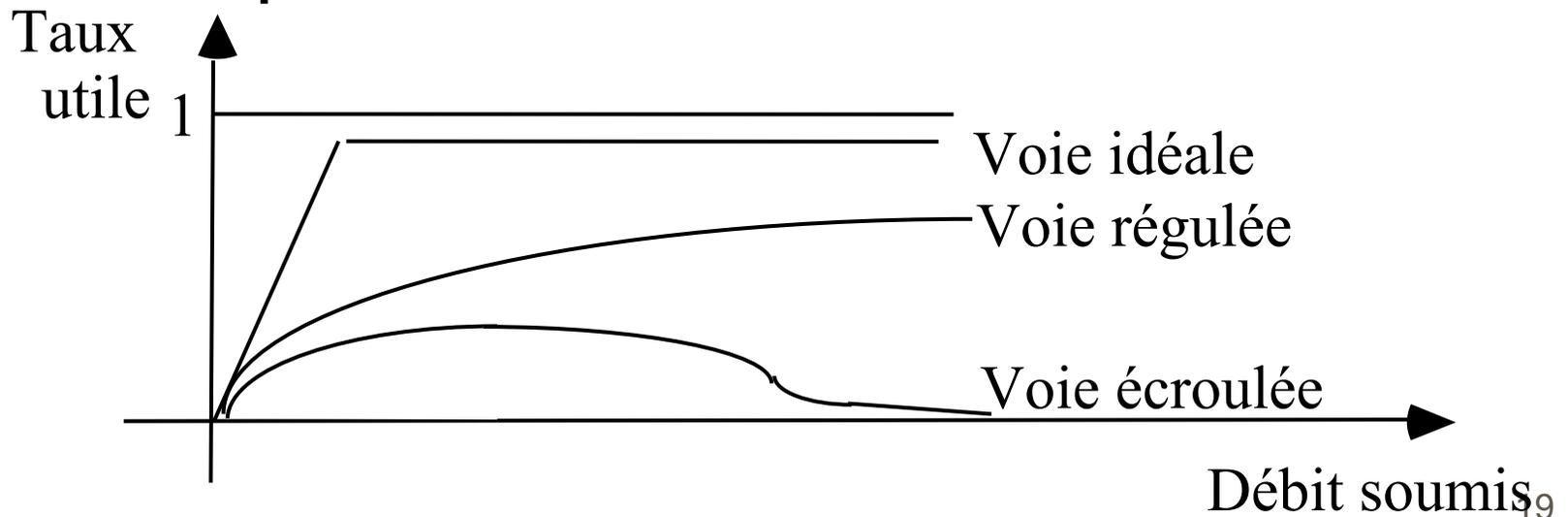
■ Exemple : si le débit soumis croit vers le débit maximum le temps de réponse tend vers l'infini (**voie saturée**).



Critères de performances :

Point de vue global

- Maximisation du débit global.
- Prévention de l'écroulement (' thrashing ').
- Si le trafic écoulé continue à croître avec la charge la voie est dite **adaptative** à la charge ou **régulée**. Si le trafic diminue avec la charge et tend vers 0 la voie est **non adaptative** ou **écroulée**.



Critères de sûreté de fonctionnement

- Le réseau local doit être **sûr de fonctionnement** ("dependable") (**Panne** du réseau : **arrêt** de nombreuses fonctions de l'entreprise).
 - Critères quantitatifs classiques, **Fiabilité**, **Disponibilité**, ...
- **Evitement des pannes** : un dispositif (un ensemble de fonctions) "peu fiable" ne doit pas être **indispensable** au fonctionnement.
- **Partage d'accès 'centralisé' (dissymétrique)**
 - Un dispositif joue un rôle primordial dans le partage (exemple un arbitre)
- **Partage d'accès 'décentralisé' (symétrique)**
 - Aucun site n'est essentiel au partage de la voie.
- **Tolérance aux pannes** : introduction de redondances.

Conclusion: propriétés principales



■ Critères qualitatifs

- Topologie d'interconnexion.
- Coopération / Compétition.

■ Critères de performance

- QOS : Temps de réponse.
- Débit global, Protocole Adaptatif/Non adaptatif.

■ Sûreté de fonctionnement

- Centralisé / Décentralisé.

Réseaux locaux partagés



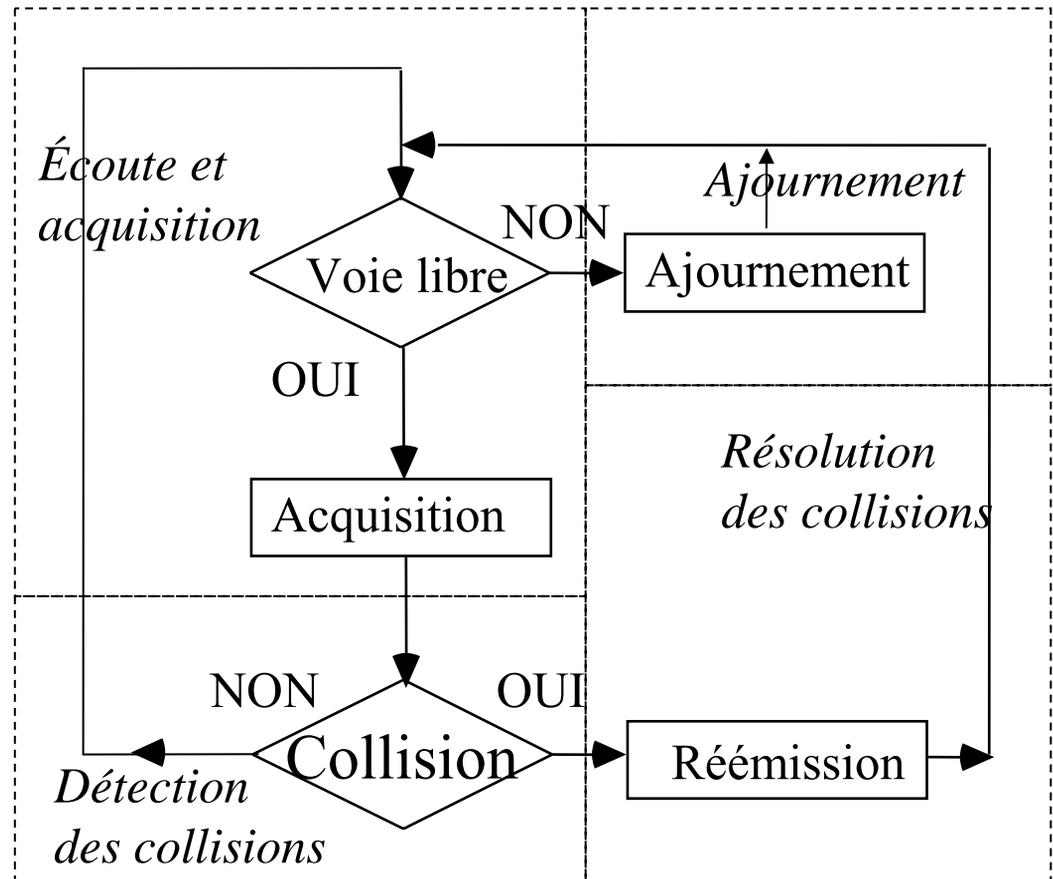
Protocoles de partage
d'une voie commune en
compétition

Introduction: protocoles en compétition ('contention protocols')

- Étude des protocoles avec accès en compétition :
 - Émission sans être certain d'être le seul à émettre.
 - Nécessité de prévoir des retransmissions.
- **Type de médium partagé** : Bus ou voie radio.
- **Solution** : Réseau filaire **Ethernet 802.3**
- **Solution** : Réseau radio ' wireless ' **WIFI 802.11**
- Une **proportion très importante** des protocoles de partage de voie commune.

Introduction: caractéristiques d'un protocole en compétition

- **Écoute et Acquisition** : actions entreprises pour s'emparer de la voie commune.
- **Ajournement** : actions entreprises si l'on constate que la voie est occupée.
- **Détection des collisions** : moyens par lesquels un conflit d'accès à la voie est détecté.
- **Résolution des collisions** : stratégie adoptée pour retransmettre une trame en collision.



A) Écoute préalable et acquisition

- **Émission sans écoute préalable:** (Émission sourde N. Abramson) "Aloha Pur" .

- Un émetteur passe immédiatement en toutes circonstances en **mode acquisition**.

- Les stations **n'écoutent pas** la voie.

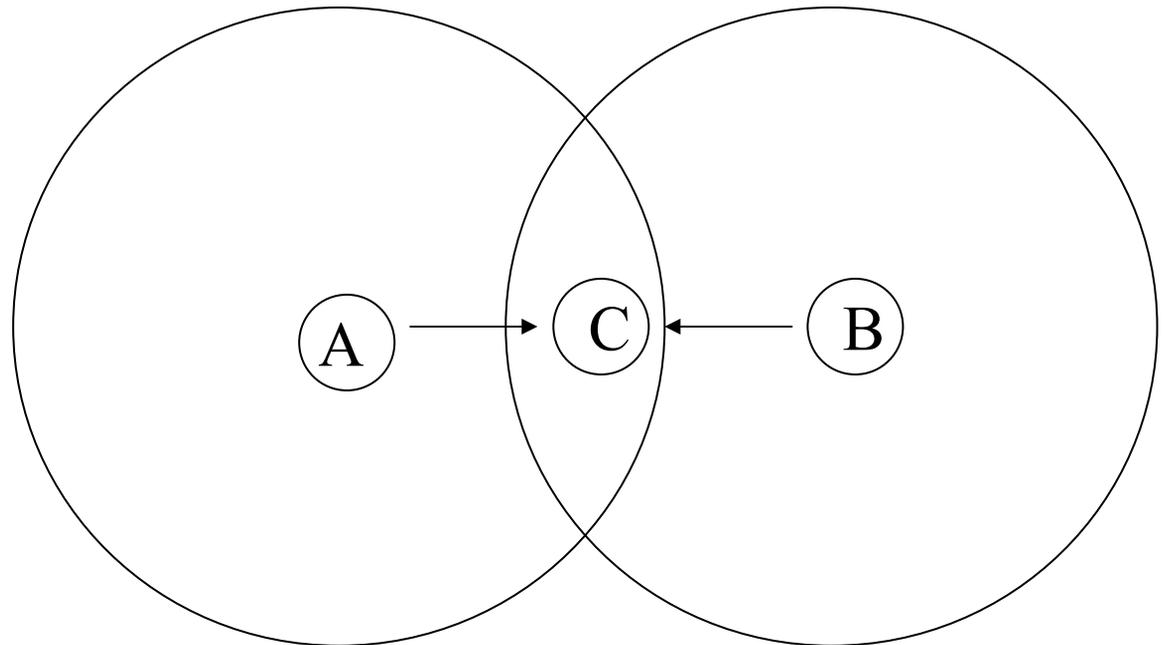
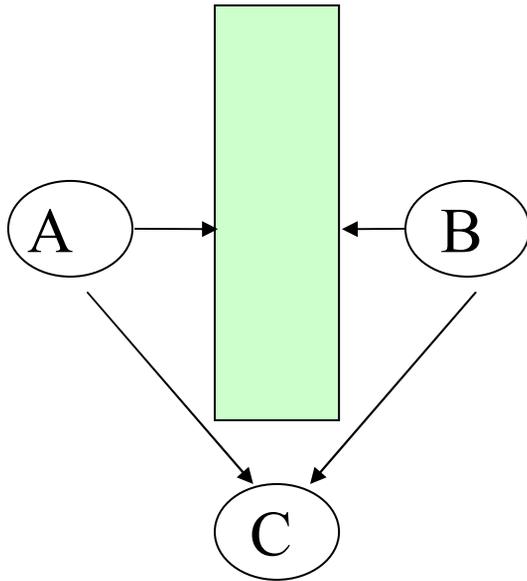
- **Émission avec écoute préalable:** (CSMA "Carrier Sense Multiple Access", L.Kleinrock) Ethernet, WIFI

- Si la voie est détectée libre, l'émetteur passe en **mode acquisition**.

- Si la voie est détectée occupée, l'émetteur passe en **mode ajournement**.

Écoute préalable en réseau radio: le problème des stations cachées

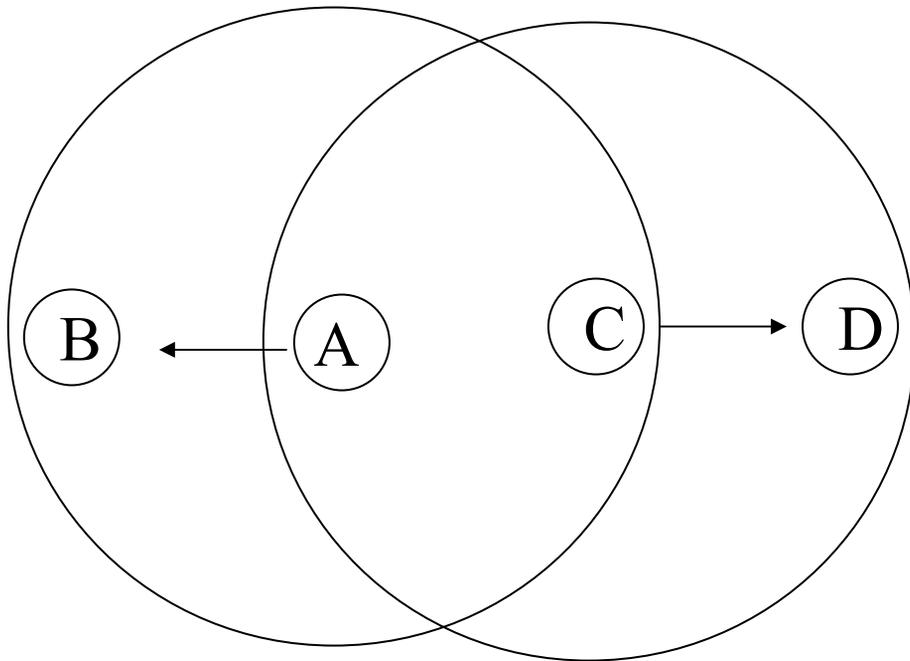
■ Réseaux radios : écoute préalable possible mais des difficultés.



Station cachée: Obstacle

Station cachée: Affaiblissement

Écoute préalable en réseau radio: le problème des stations exposées

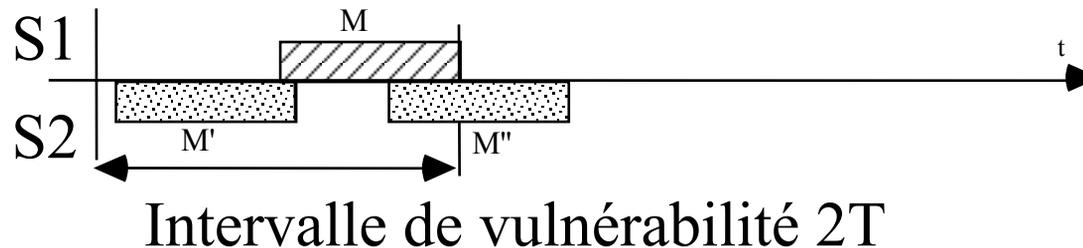


Stations exposées A et C

- A émet vers B.
- C qui fait de l'écoute pour émettre vers D constate la transmission de A et **attend sa fin.**
- D est hors de portée de A donc **l'attente de C est inutile.**

Intervalle de vulnérabilité: cas d'une acquisition sans écoute

- Intervalle de temps pendant lequel **deux stations ne peuvent commencer d'émettre** sans écoute et provoquer une collision
- Il suffit que **le dernier bit d'une trame se superpose avec le premier bit** d'une autre trame pour qu'il y ait **collision**.

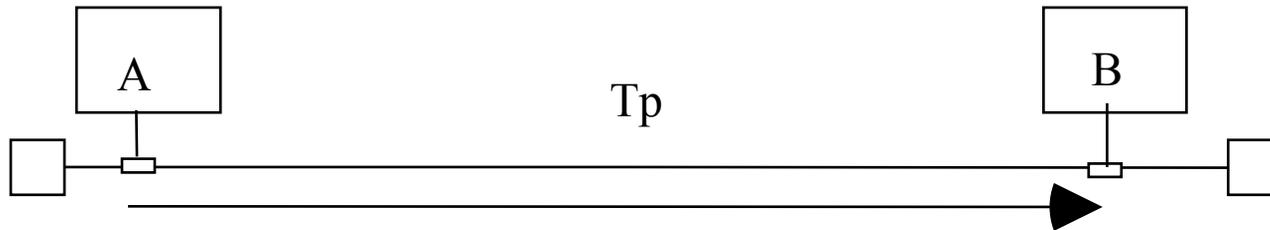


 Hypothèse: messages de durée T fixe

- Pour qu'une trame de durée T soit transmise sans collision il faut qu'aucune autre trame de durée T ne soit transmise pendant un intervalle $2T \Rightarrow$ **performance très médiocre**.

Intervalle de vulnérabilité: cas d'une acquisition avec écoute

- Intervalle de temps pendant lequel deux stations peuvent émettre et provoquer une **collision** malgré l'écoute.



- A et B situées aux **extrémités** du médium, A **écoute** le canal, ne détecte rien, décide d'émettre à t_0 .
- Soit T_p le **temps de propagation** entre A et B (fonction de la vitesse de la lumière, des retards introduits sur le câble par les éléments matériels : transmetteurs, répéteurs, ...).
- B peut commencer à émettre entre t_0 et $t_0 + T_p$ (pour lui la voie est libre) => on a une **collision**.
- L'intervalle de vulnérabilité est T_p .

B) Ajournement ('deference')

Ajournement Persistant (Ethernet)

- **Émission immédiate** si la voie est libre ou dès que la trame courante est finie.
- Hypothèse de la solution: **Le trafic sur la voie est faible**
 - La probabilité pour que deux nouvelles demandes apparaissent pendant la transmission d'une trame est faible.

Ajournement non Persistant (WIFI)

- Emission immédiate si la voie est libre. Si la voie est occupée **différer la transmission** comme s'il y avait **collision**.
- Hypothèse de la solution: **Le trafic sur la voie est élevé**
 - Si une trame a risqué d'interférer avec une autre c'est qu'il y a de la charge qui nécessite déjà d'appliquer un retard adaptatif.

C) Détection des collisions :

Par écoute de la voie

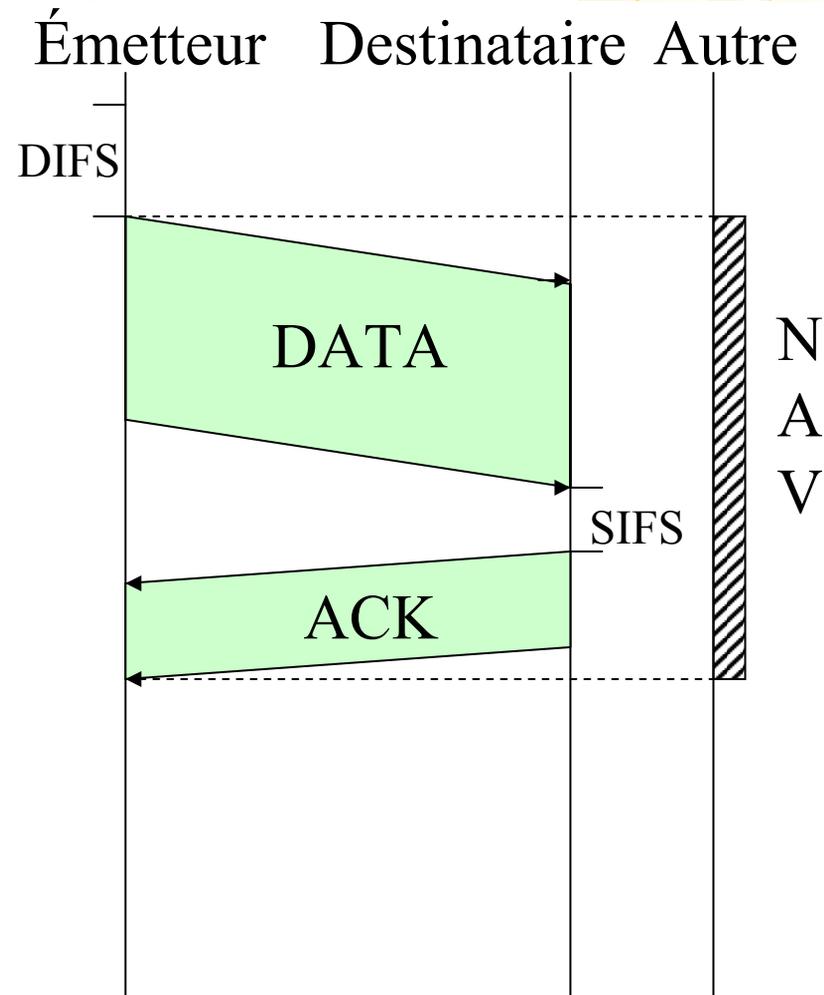
- Quand l'écoute des collisions est possible
- La stratégie d'écoute dépend du médium **utilisé**
 - Si on a deux **signaux séparés** (transmit/receive) exploitation **en parallèle** du signal émis et du signal reçu (exemple 10 Base T).
 - Mesure de la **puissance** moyenne du signal.
La puissance moyenne sur la voie en cas de collision est **anormale** (plusieurs signaux sont superposés exemple 10 Base 2, 10 Base 5).
- L'écoute **suppose** l'existence d'une **durée minimum** de la collision permettant la détection.
- Solution type : **le CSMA/CD** ' Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection ' **Ethernet 802.3**

Détection des collisions : Cas d'une Écoute impossible

- Réseaux radios : l'écoute des collisions est non prévue (très coûteuse ou impossible).
- A la place utilisation d'un **protocole de liaison classique** :
 - code détecteur d'erreurs, accusé de réception positif si la trame est correcte
 - délai de garde, retransmission si la trame est incorrecte
- Les collisions sont **traitées comme des erreurs de transmission** sur les trames.
- **Solution du réseau WIFI** (un protocole de base et un protocole plus sophistiqué, le **CSMA/CA** ' Carrier Sense with Multiple Access/ Collision Avoidance ').

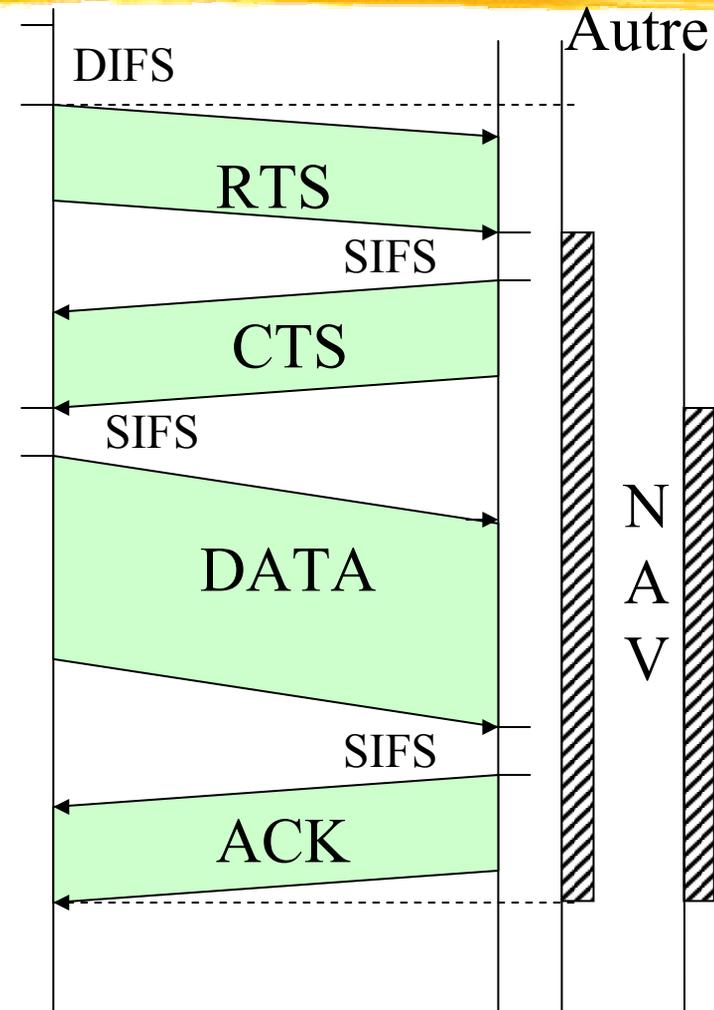
802.11-WIFI : Le mode de base de détection des collisions

- L'émetteur **détecte la voie libre** pendant un délai DIFS.
- Il émet une trame **Data**.
- Une collision **peut avoir lieu** sur la trame data. L'émetteur attend une trame de réponse de type Ack.
- Ack doit être émis **après une attente courte baptisée SIFS**.
- Si l'Ack n'est pas transmis c'est qu'il y a eu **problème**. Le réseau est à nouveau partageable après DIFS.
- Pendant ce temps **les autres sont en attente** (indicateur NAV ' Network Allocation Vector ').

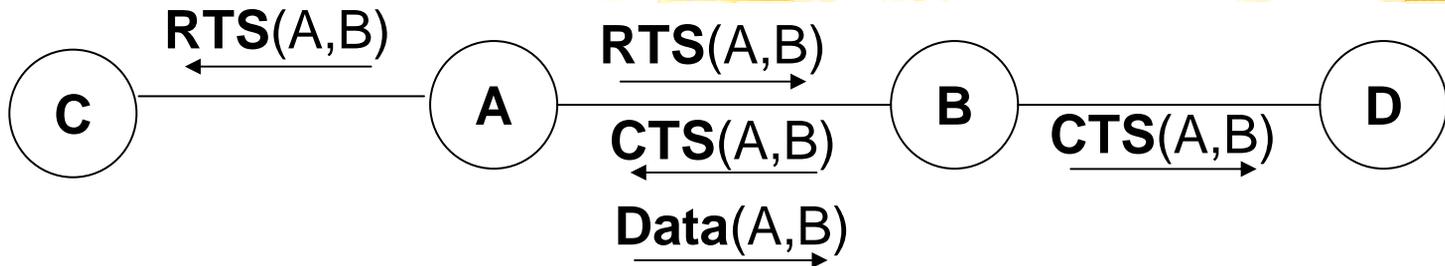


802.11-WIFI : le CSMA/CA (' Collision Avoidance ') avec l'échange RTS/CTS

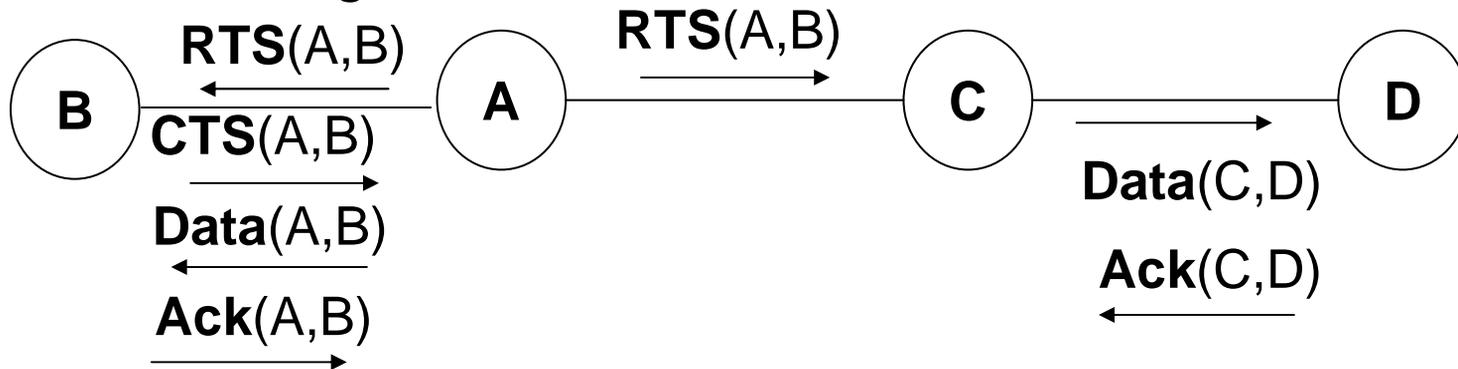
- Après un silence **DIFS** l'émetteur émet un message court **RTS** (Request to send) signalant **qu'il veut émettre**.
- Le destinataire transmet une réponse courte **d'acceptation CTS** (Clear To Send).
- RTS-CTS réussi: la trame est **transmise**.
- La collision **peut avoir lieu** que sur le message court **RTS** => limitation de la durée d'une collision.
- CTS correct indique **qu'il n'y a pas eu de collision** sur RTS (détection des collisions).
- La trame data suivie de son acquittement positif peut être échangée **sans collision**.



Le CSMA/CA et le problème des stations cachées et exposées



- La station cachée D qui perçoit le CTS reste silencieuse (la durée du message DATA circule dans RTS et dans CTS)



- La station exposée C entend RTS(A,B) mais pas le CTS(A,B): C déduit qu'une transmission de C vers D ne peut interférer en B ni gêner A tant que A transmet DATA (A,B).

D) Résolution des collisions : retransmission non adaptative

La prochaine tentative après une collision est effectuée selon **une distribution qui ne dépend pas du débit soumis au réseau** (non adaptative à la charge).

- Exemple: Tirage aléatoire d'une durée d'attente selon **une distribution statique** ou même dépendante du site.
- A forte charge de toutes façons les stations provoquent de plus en plus de collisions et la voie est non régulée => **écroulement**.

Résolution des conflits : Réémission adaptative

La prochaine tentative après une collision est effectuée après une attente proportionnelle à la charge.

- **Solution centralisée** : Un site d'administration mesure en permanence le trafic par observation de la voie.
- Il diffuse périodiquement ses mesures aux stations qui les utilisent pour définir un délai de **retransmission adaptatif** en fonction de la charge.
- **Solution répartie** : Chaque site se base sur des **connaissances purement locales** pour déterminer sa politique de **retransmission**.
- **Excellente solution**: prendre comme indicateur de charge **le nombre de collisions** qu'un message vient de rencontrer.
- **Algorithme du retard binaire exponentiel** (BEB ' Binary Exponential Backoff ') : **deux versions très voisines** de cette solution sont utilisées en Ethernet et WIFI.

Résolution des conflits: Algorithme du retard binaire Ethernet

```
Retard_Binaire (nb_collision: entier)
ST : flottant := 51.2 ; fact_mult, delai : flottant ;
début
    si ( nb_collision < 10 ) alors
        fact_mult := 2**nb_collision ;
    sinon
        fact_mult := 2**10;
    finsi;
    délai := ST * int (random*fact_mult);
    attendre (délai);
fin;
```

Commentaires : algorithme du retard binaire Ethernet

- On attend **un délai distribué aléatoirement**, (**random** est un générateur de nombre aléatoire $[0,1[$).
- **Uniformément distribué** sur un intervalle,
- **Qui double** à chaque collision,
- Pendant **les 10 premières tentatives**.
- On évalue l'attente en nombre entiers de "slot time" ST. (**int** est une fonction qui rend la valeur entière par défaut).
- **On montre que cette solution est non écroulée pour moins de 1024 stations.**
- On fait **au maximum 16 tentatives** (caractéristique non intégrée au retard binaire).

Réseaux locaux partagés



Réseaux locaux Ethernet

Historique

Niveau liaison

Ethernet 10 Mb/s

Ethernet 100 Mb/s

Ethernet Gigabit

Ethernet 10 Gigabits

Auto négociation

Historique Ethernet

- Origine **R.M Metcalfe** (Rank Xerox Palo Alto). Début des travaux 1973. Article CACM 1976 (Metcalfe et Boggs).
- Protocole en compétition sur coaxial à **2,94 Mb/s** (1976).
- Brevet **Ethernet** (1977): début de l'industrialisation.
- Norme DIX ("Digital Intel Xerox") 10 Base 5 (1980)
- Normalisation **IEEE 802.3** (1983)
- 10 Base 2 (1986), 10 Base T (1991), 10 Base F (1994)
- Ethernet 100 Mb/s : 802.3u (1995)
- Ethernet gigabit/s : 802.3z/802.3ab (1998)
- Ethernet 10 Gigabits/s : 802.3ae (1999-2006)

Ethernet niveau MAC : principales caractéristiques de la version de base

- protocole d'accès au médium en **compétition**.
- **écoute** de porteuse (CSMA).
- **ajournement** persistant (1-persistant).
- **détection** de collisions par écoute (CD).
- **retransmission** avec retard binaire.
- **destruction silencieuse** des messages bruités.
- **sans connexion**.
- pas de **fragmentation**, de **reprise** sur erreur, de **contrôle de flux**.
- délivrance '**au mieux**' ('Best Effort').

Ethernet : Notion de 'tranche canal' ('ST Slot Time')

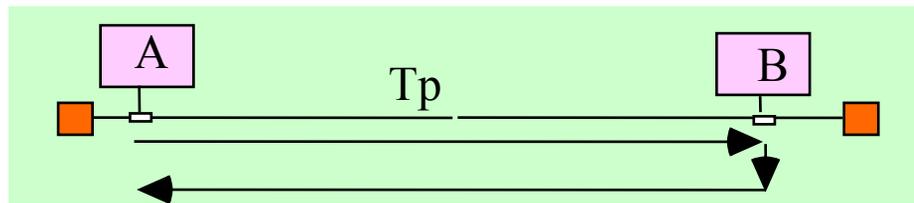
- **Principe CSMA/CD** : toute collision doit être **détectée** par le niveau MAC et celui-ci doit assurer la **retransmission**.
- ST est un **délai fixé par la norme Ethernet**.
- **a)** Dans le délai **ST** toute station détecte à coup sur **toute collision**.
- **Conséquences** :
 - ST fixe **la taille minimum d'une trame**.
 - Après qu'une station a pu transmettre pendant une durée au moins égale à ST, **elle a acquis la voie : elle ne doit plus rencontrer de collision**.
- **b)** Dans le délai **ST** toute **collision** est terminée (on ne poursuit pas une collision sur toute la durée d'un message éventuellement long).

Ethernet :

Fixation de $ST > \text{Délai d'aller retour}$

■ Délai d'aller retour ('Round Trip Propagation Delay')

A et B situées aux extrémités du réseau. Une collision sur une trame de A vers B n'est perçue en A qu'à $t_0 + 2 T_p$



T_p le temps maximum de propagation du signal

■ Ethernet 10 Mb/s : Délai d'aller retour $2 T_p = 46,4 \mu\text{s}$.

■ $ST > 2 T_p$ fixé à $51,2 \mu\text{s} = 46,4 + 4,8 \mu\text{s}$ (512 temps bit)

=> La taille minimum d'une trame Ethernet est de 64 octets (valeur fixée sans compter le préambule).

Ethernet : Le renforcement de collision (' brouillage ' ' jam ')

- **Brouillage ("Jam")** : Après détection de collision l'émetteur transmet sur le médium une information non significative.

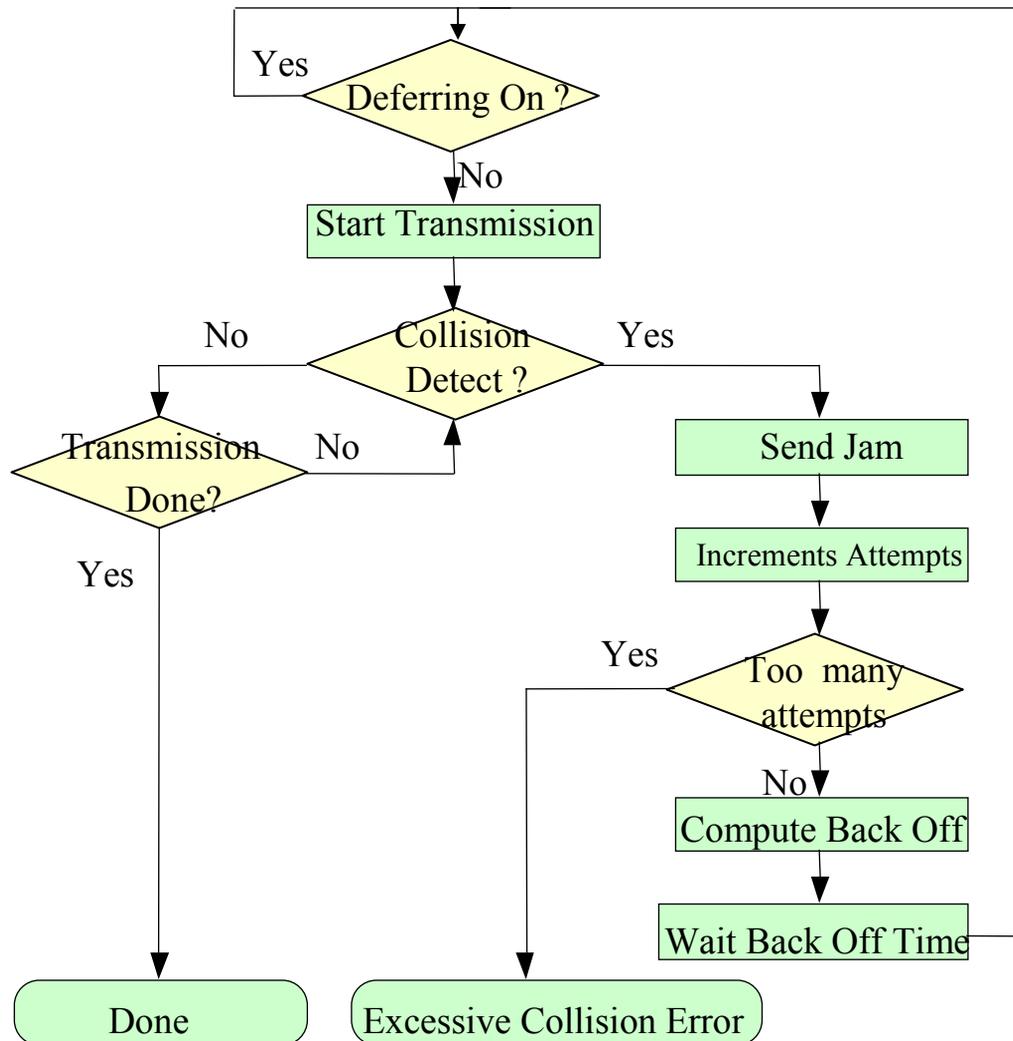
 - La durée du brouillage est le plus souvent de $3,2 \mu\text{s}$.

- Idée de **durée minimum d'une collision** (renforcement de collision): toute trame en collision à une durée minimum pour être détectable par tous (au moins 96 temps bits).

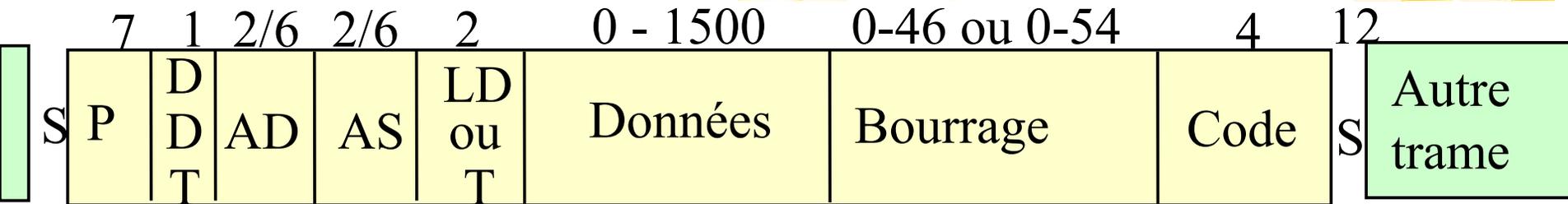
- Idée de **limitation de la durée d'une collision** à la durée maximum nécessaire à la détection de la collision plus la durée du brouillage. Le brouillage fixe la définition de ST donc la durée maximum d'une collision.

ST : Délai d'aller retour ($46,4 \mu\text{s}$) + Brouillage ($4,8 \mu\text{s}$)

Ethernet : comportement général

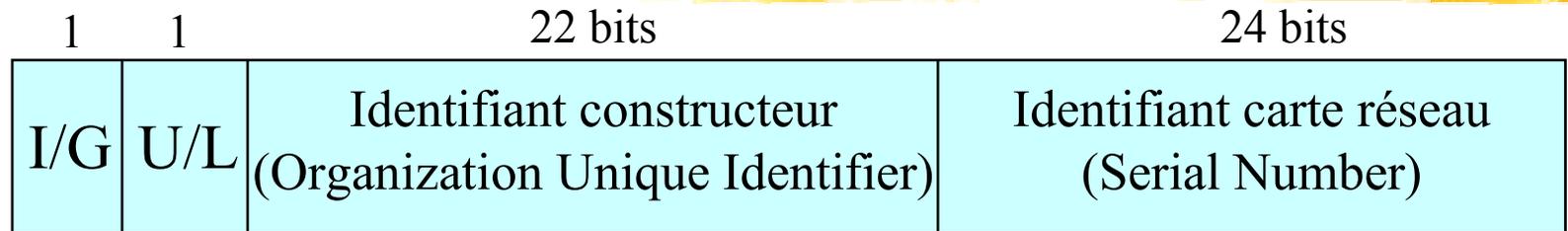


Ethernet : structure de la trame



- P : Préambule 'Preamble' : 7 octets 101010... synchro bit.
- DDT : Délimiteur début de trame 'Start Of Frame': 10101011 synchro octet.
- AD : Adresse Destination 'Destination address' (6 octets) possibilité 2 octets.
- AS : Adresse Source 'Source Address' (6 octets) (ou 2 octets).
- LD : Longueur des données 'Length' (802.3) ou T: Type de la trame (DIX).
- Données + Bourrage: La charge utile de 1500 octets au plus (Entête + Données + Bourrage + Code : longueur min 64 octets).
- Code: Code polynomial détecteur d'erreur (FCS 'Frame Check Sequence').
- S : Silence inter-trame 'IFG Inter Frame Gap' (9,6 micro seconde soit 96 temps bit).

Ethernet : adressage IEEE 802



- **Notation** : 6 groupes de 2 chiffres hexadécimaux 00-DD-01-30-C3-17
Format canonique grand boutiste sur les octets, petit boutiste sur les bits.
- **I/G** : Adresse Individuelle/Groupe (**I**ndividuelle = 0 ; **G**roupe = 1)
"Broadcast" (tous les bits à 1) adresse diffusion générale FF-FF-FF-FF-FF-FF
"Multicast" G=1 + adresse de diffusion sur groupe : 01-00-5E-00-A8-76
- **U/L** : Adresse Universelle (unique) / Locale (non unique) (U=0 ; L= 1)
- **Identifiant constructeur** (' OUI Organisation Unique Identifier') (RFC 1340), **carte** (' SN Serial Number ').
- **Exemple** : 00-AA-00-08-C3-98 , Les trois octets de gauche 00-AA-00 désignent le constructeur INTEL, les trois octets de droite 08-C3-98 sont l'adresse unique d'une carte réseau.

Ethernet partagé : performance

■ Temps de réponse pour un utilisateur :

- Débit soumis < 50% : bon comportement , temps d'attente moyen < 1 ms.
- 50% < Débit soumis < 80% : délai supportable < 10 milliseconde.
- Débit soumis > 80% : mauvais comportement (exemple 100 stations, débit soumis 90 % à 10 Mb/s temps d'attente moyen 10 seconde).

■ Débit maximum :

- **Une idée fausse** : on ne récupère pas plus de 37% de la bande passante.
- **Mesure** sur un Ethernet réel de 10 Mb/s avec 24 stations émettant en permanence des messages de 64 octets: **taux de trafic utile 90%**.
- Trois paramètres influencent le débit maximum récupérable :
 - **Le nombre de stations connectées**: 1 à 1024, en fait moins de 200 souhaitable.
 - **Le débit soumis par station**: normalement le trafic est très sporadique avec un débit soumis en moyenne faible (un débit constant élevé n'est pas prévu).
 - **Taille des trames** : effet des collisions plus important pour des trames petites, remplissage en données utilisateurs moindre pour des trames petites (64 = 46+18 14888 trames/s 5,476Mb/s , 1518= 1500+18 812 trames/s 9,744 Mb/s).

Réseaux locaux Ethernet

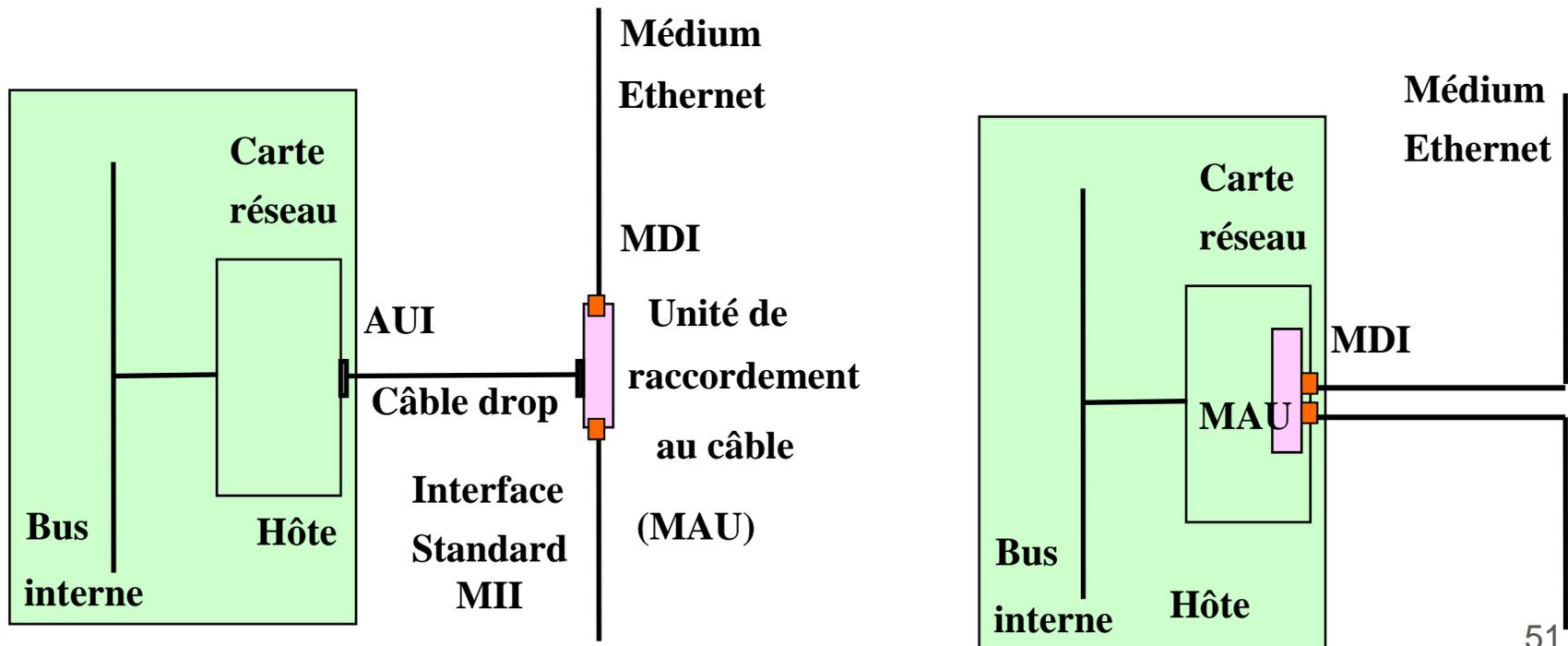


Ethernet:

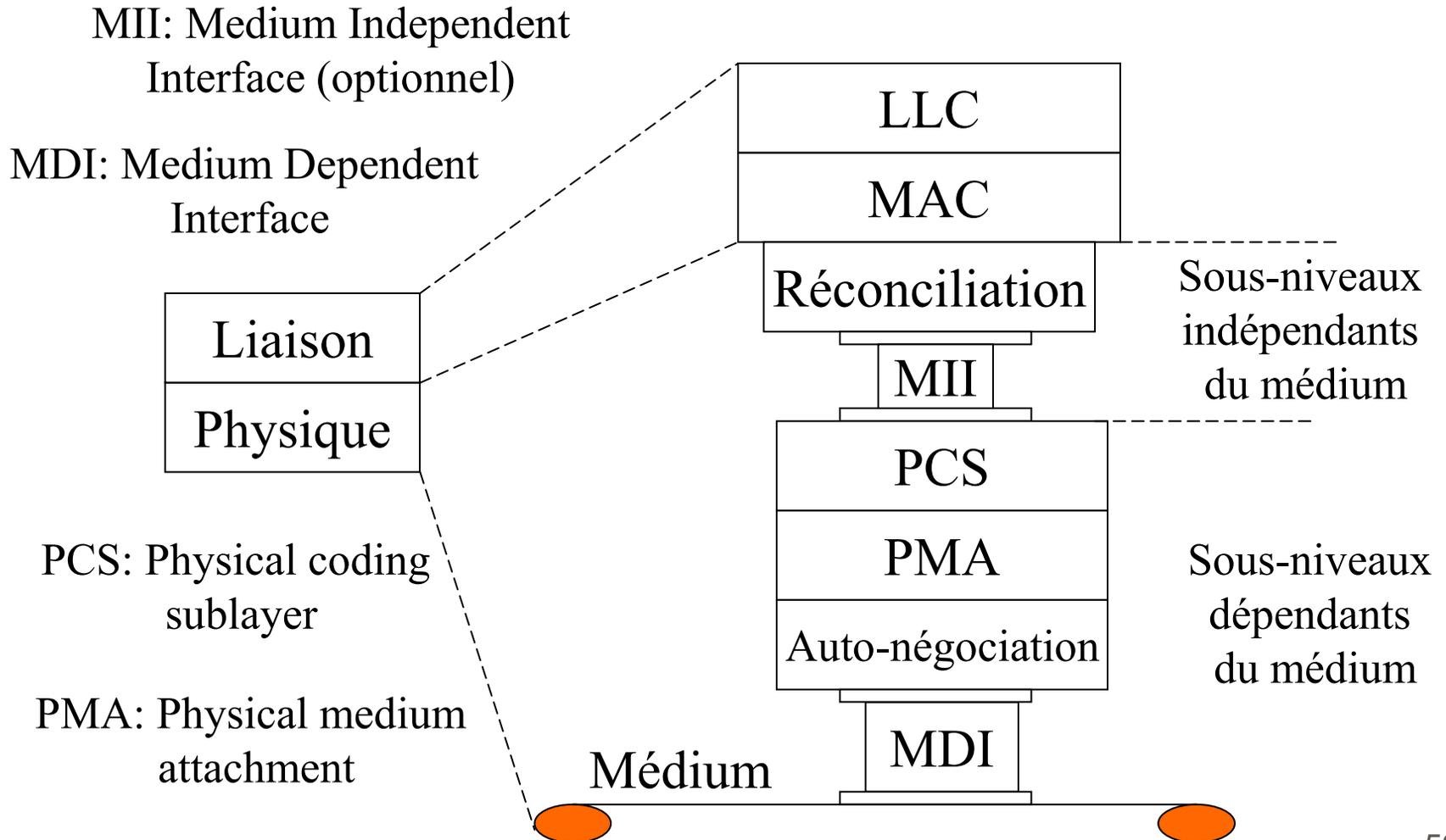
les standards à 10 Mb/s au
niveau physique

Ethernet 10 Mb/s : configuration au niveau physique

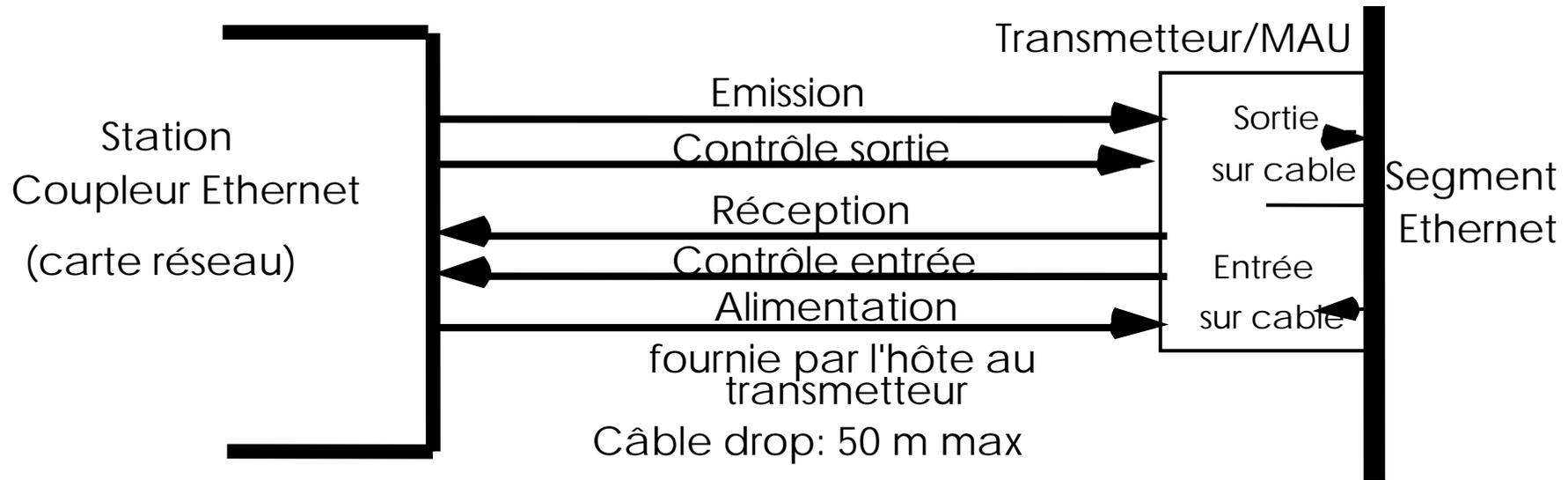
- **Interface indépendante** (MII "Medium Independent Interface"): à 10 Mb/s AUI : "Attachment Unit Interface" , Câble drop/"Transceiver Cable"
- **Raccordement au médium** (PMA "Physical Medium Attachment"): Transmetteur "Transceiver" ou MAU "Medium Attachment Unit"
- **Prise sur le câble** (MDI "Medium Dependent Interface")



Modèle générique de découpage en couches du niveau physique ETHERNET



L'interface indépendante à 10 Mb/s ("AUI : "Attachment user interface")



Alimentation, Données en émission, Données en réception

Contrôle en entrée: *Transmetteur disponible* IDL : aucun signal.

Transmetteur indisponible CS1 : horloge demi fréquence bit Ethernet.

Erreur qualité du signal CS0 : horloge à la fréquence bit Ethernet.

(1) Signal impropre (coupure, MAU HS) (2) Collision

Contrôle en sortie (*Très peu Implanté*).

Les différents standards de niveau physique Ethernet à 10 Mb/s

■ Système de désignation physique Ethernet : A, L, B

- **A** : Définit la vitesse : 1, 10, 100, 1000, 10G.
- **L** : Deux valeurs BASE : bande de base. BROAD : bande large (broadband).
- **B** : Définit la longueur maximum d'un segment exprimée en centaines de mètres ou définition d'un type de médium.
- **Exemple** : **10 BASE 2** 10 Mb/s en bande de base, longueur max d'un segment 200m (environ), **100 BASE T2** 100 Mb/s en bande de base sur deux paires torsadées.

■ Principaux standards à 10 Megabits/s

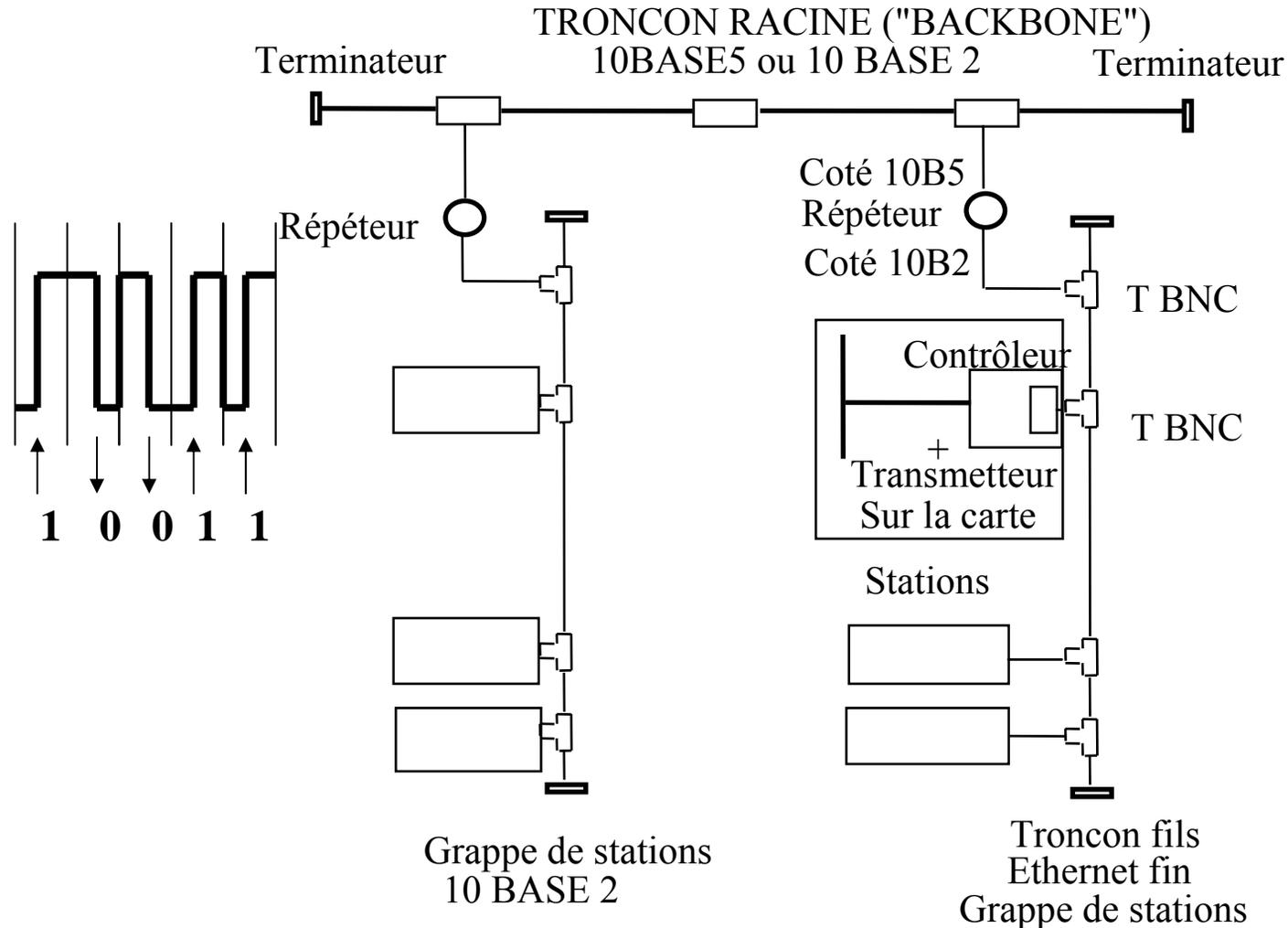
- | | |
|---------------------------|-------------------|
| ■ Ethernet gros | 10 BASE 5 |
| ■ Ethernet fin | 10 BASE 2 |
| ■ Ethernet paire torsadée | 10 BASE T |
| ■ Ethernet fibre optique | 10 BASE FL |

10 BASE 2 Ethernet fin "Thin Ethernet" , "Thinnet"

- Spécification très voisine du 10 BASE 5.
- Version plus économique pour réseaux de stations ou de micros.
 - **Caractéristiques du câble coaxial fin**
- Diamètre 0.2 pouce 5 mm.
- Impédance caractéristique 50 Ohms.
- Longueur maximum du tronçon 185 m.
- Espacement des transmetteurs 5 m.
- Maximum de 30 transmetteurs par tronçon.
- Raccordement au câble : prise BNC (Bayonet Neil-Concellman).
 - **Caractéristiques de la signalisation**
- **10 Mégabits/seconde, bande de base, code "Manchester".**

10 BASE 2 ETHERNET FIN

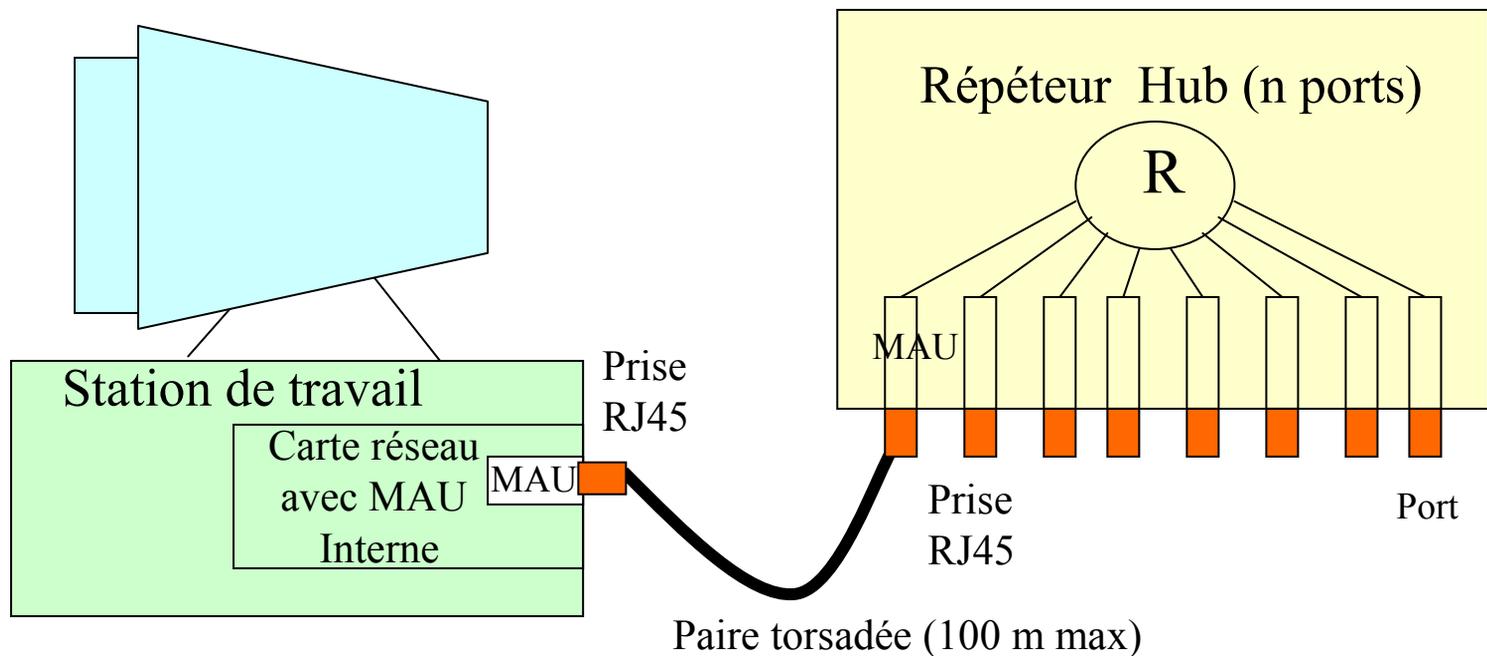
Architecture du réseau



10 BASE T

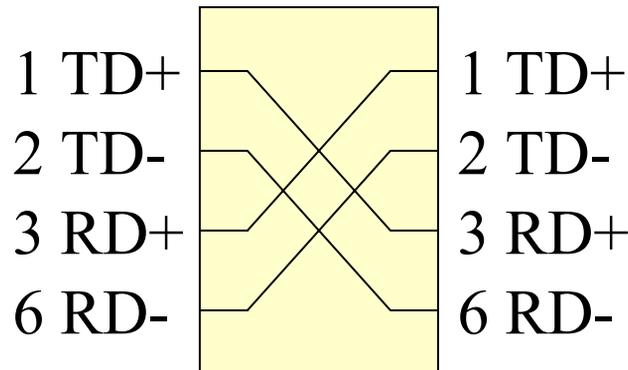
Ethernet sur paires torsadées

- A partir des idées de **Starlan** réseau en compétition sur paires torsadées: **10 Base T** est devenu **le standard le plus répandu**.
- Utilisation de la **paire torsadée** : médium **économique**, redéfinition des prises standards (MDI RJ45) et des transmetteurs (MAU).
- Topologie en étoile avec des **répéteurs** autre terminologie (concentrateurs, 'hubs', **répéteurs** multiports, 'repeater hubs').



10 BASE T : signalisation

- Ethernet 10 BASE-T utilise **deux paires** torsadées de catégorie 3 ou supérieure.
 - Paire émission **TR transmit data**
 - Paire réception / écoute des collisions **RD receive data**
- Connecteur normalisé **8 broches** RJ-45
- Broches 1 TD+ , 2 TD- , 3 RD+ , 4 inutilisé, 5 inutilisé, 6 RD- , 7 inutilisé , 8 inutilisé).



Construction d'un câble croisé

Fonctionnement d'un répéteur multiport

- **Propagation** : Un signal valide arrivant sur l'un des ports du répéteur est **régénéré et rediffusé** sur les autres ports.
 - Restauration de l'amplitude (' signal strength')
 - Re-synchronisation selon l'horloge du répéteur (' timing')
 - Restauration de la forme des bits (' symmetry')
- **Collisions** : Si **deux ports sont en collision**, le répéteur doit le détecter et générer **un signal de renforcement**
 - **Renforcement de collision** : en cas de détection de collision entre deux entrées A et B, le répéteur génère sur tout ses ports de sortie un signal de brouillage ' jam ' (une suite de 32 bits 01010). La durée du fragment, bits transmis et brouillage est de 96 bits au moins.
 - **Extension des fragments** : si une suite de bits de taille inférieure à 96 bits circule, un répéteur doit générer à la place au moins 96 bits.

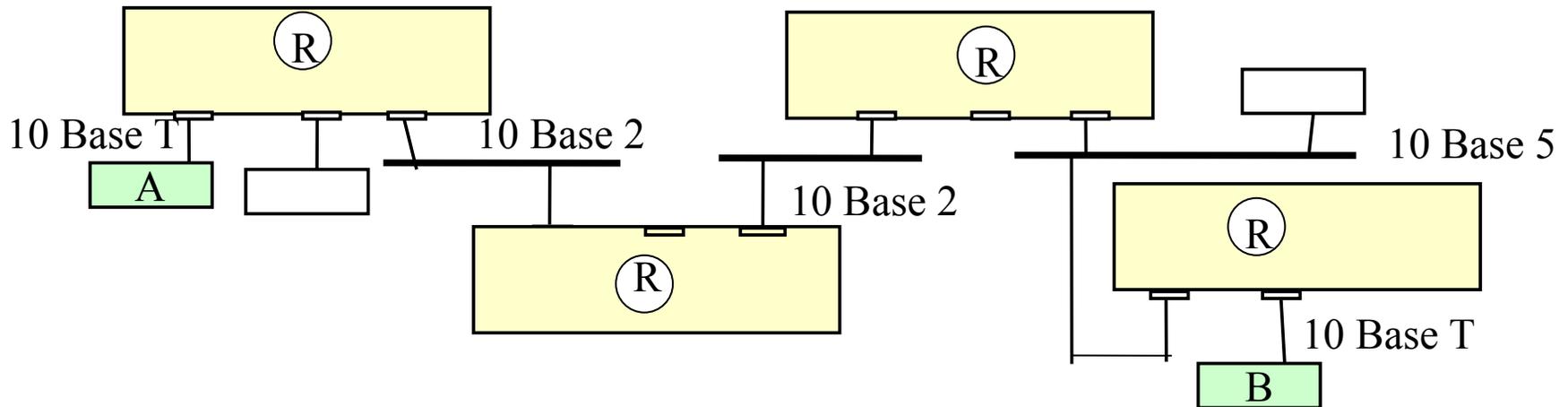
10 BASE T Fonctionnement

' multi segments ', ' multi répéteurs '

■ On peut mêler les standards 10 BASE 2, 10 BASE 5, 10 BASE T en respectant **la contrainte de détection des collisions**.

■ Empiriquement on peut cascader au plus **quatre répéteurs multiports** et au plus **cinq segments dont trois coaxiaux**.

■ Sinon technique précise de **validation d'une architecture par évaluation du diamètre de collision**.



■ **Exemple d'interconnexion** de réseaux 10BASE 2, 5 et T avec 4 répéteurs

10 BASE F : Ethernet sur fibre optique

- Utilisation d'un **médium fibre optique** en point a point entre transmetteurs optiques.
- Une fibre en **émission**, une fibre en **réception**.
- Câblage en étoile avec des **répéteurs** (hubs).
- **Plusieurs variantes 10base FL (Link), 10 Base FB (Backbone), 10 Base FP (Passive).**
- **10 BASE FL – Fibre 62,5/125 micromètres, émission LED, longueur d'onde 1300 nm.**
- Longueur maximum d'un **segment 2km.**
- Nombre maximum de stations : **1024**
- **Solution fibre optique plus chère** mais la plus résistante aux perturbations électromagnétiques ou aux écoutes.

Conclusion : Ethernet 10

- **Un standard qu'on n'installe plus** mais une base installée **encore très importante.**
- Le débit de 10 Mégabits/s **reste suffisant** pour la plupart des applications.
- **Pas forcément nécessaire** de transformer très rapidement toutes les infrastructures sauf besoin précis (scientifique ou multimédia).

Réseaux locaux Ethernet



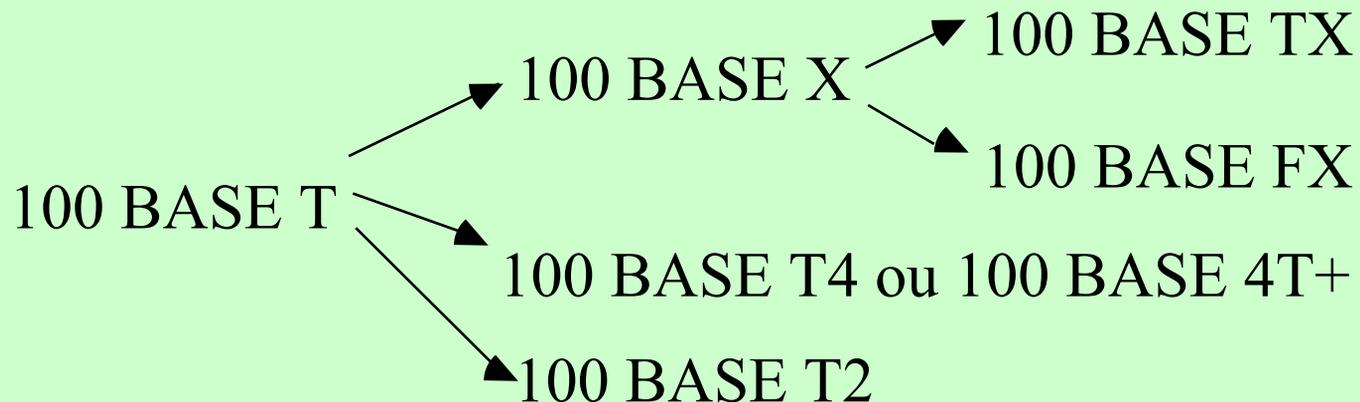
Ethernet:

les standards à 100 Mb/s au
niveau physique

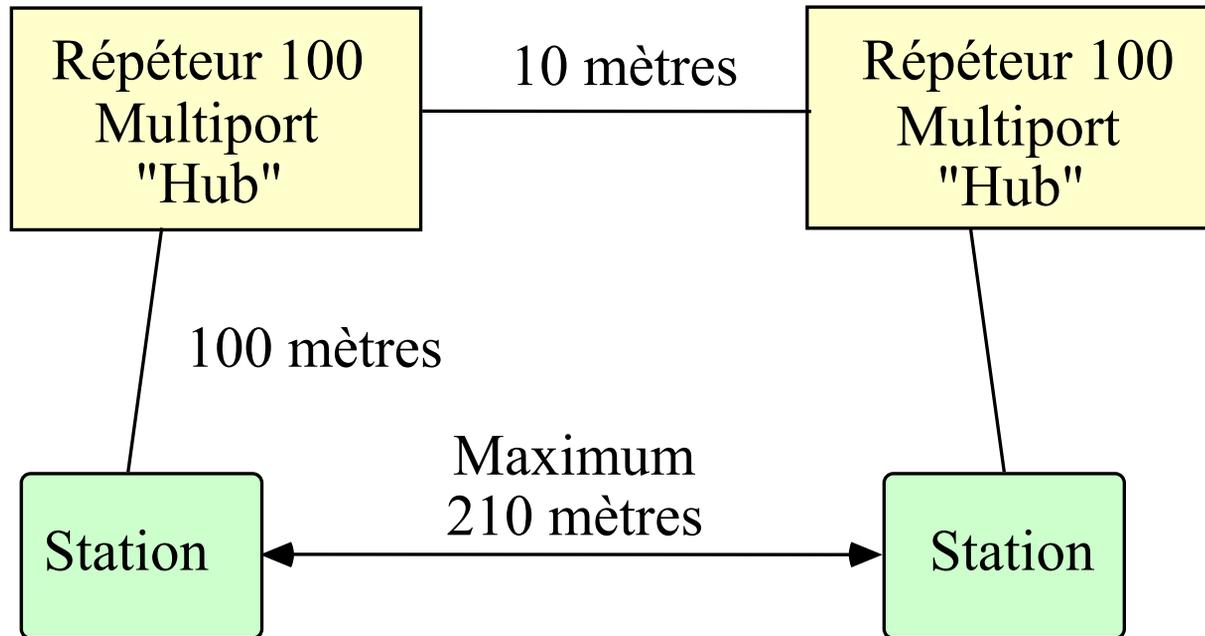
Standard 100 BASE T

"Fast Ethernet" "IEEE 802.3u"

- **Objectif** : conserver une **compatibilité maximum** avec le standard 10 Mb/s => Changer uniquement le débit.
- **Ethernet 100 base T** conserve d'Ethernet 10 **tout le niveau liaison** : le protocole **CSMA/CD**, le **format des trames** etc...
- **Modifications temporelles**: **ST 5,12 μ s** , **IFG 0,96 μ s**.
- **Niveau Physique** : **plusieurs standards** selon les supports de communication (adaptation du nombre de paires et adaptation des codages).



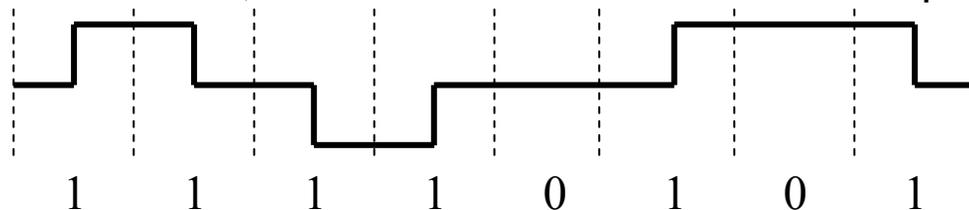
Ethernet 100 Base TX sur paires torsadées: architecture



- Fonctionnement avec des **répéteurs 100 type II** : Distance station répéteur 100 mètres, distance répéteur-répéteur 10 m.
- **Répéteur Ethernet 10/100**: un seul débit 10 Mb/s ou 100 Mb/s à un instant donné.

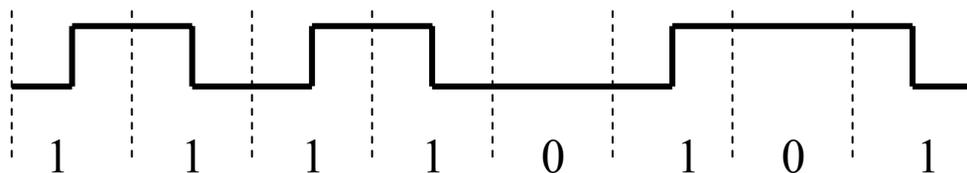
Le standard 100 Base TX: quelques éléments de niveau physique

- Utilisation de 2 paires UTP 5 norme EIA 568 avec connecteur RJ45 (également STP avec connecteur DB9).
- Gestion des signaux sur les paires comme en 10 BAS T
 - . une paire pour l'émission (données)
 - . une paire pour la réception/détection des collisions
- Débit possible sur UTP5 125 Mb/s (et plus).
- Utilisation d'un niveau physique (très voisin de FDDI):
 - Codage 4B/5B : Au moyen d'une table, 4 bits ('nibble') sont mis en correspondance avec 16 codes groupes de 5 bits, pour garantir un front tous les trois bits au plus. Les autres codes groupes de 5 bits servent pour la signalisation (3) ou sont inutilisés (11).
 - Modulation MLT3 ('Multi Level Transmission-3' pseudo ternaire).



Le standard 100 Base FX

- Appartient au standard 100 base X donc il est **très voisin du standard 100 Base Tx**.
- Fonctionnement sur **deux fibres** multi modes au lieu de deux paires torsadées.
- Distance maximum : **400 mètres** en mode half duplex et **2000m** en mode full duplex.
- Utilisation du code **4B/5B** / modulation **NRZI**.



Le standard 100 Base T4

- Uniquement en mode half duplex avec utilisation de 4 paires UTP de catégorie 3 (ou supérieures)
 - Trois paires pour l'émission/réception (données)
 - Une paire pour la détection des collisions
- Modulation à 25 Mbaud/s sur UTP3.
- Utilisation d'un code ternaire
 - Code à trois niveaux: -1 , 0 , +1 (codage de 'trits')
- Code 8B6T ("8 bits" codés par 6 "trits").
 - 3 trits représentent $3*3*3 = 27$ valeurs.
 - 27 valeurs différentes permettent de coder 4 bits (plus d'autres).
 - On code 8 bits sur 6 symboles ternaires (2 fois 3 trits successifs).
- Débit: (25 mbaud) * 4 bits = 100 Mb/s.

Le standard 100 Base T2

■ Utilisation de 2 paires UTP 3 ou de qualité supérieure.

- 'Dual duplex baseband' : on émet simultanément sur deux paires dans les deux sens. Sur une paire le signal qui circule est une somme des signaux émis dans les deux sens

- Le signal reçu est obtenu par soustraction dans le signal qui circule du signal émis.

■ Utilisation d'un code à 5 niveaux (valence 5)

■ -2, -1, 0, +1, +2

■ Code PAM 5x5 (Pulse Amplitude Modulation).

■ On code 4 bits par deux symboles 5 niveaux (en parallèle sur 2 paires)

■ Débit: $(25 \text{ mbaud}) * 4 \text{ bits} = 100 \text{ Mb/s}$.

■ Une norme astucieuse mais chère et sortie tardivement

Conclusion : Ethernet 100

- Le standard de base Ethernet.
- En **développement important**.
- Prix des cartes **bon marché**.
- Inconvénient important pour un réseau local d'entreprise en mode partagé => **faible extension géographique**
- Utilisation plus importante **en mode commuté**
 - Distances **plus grandes**.
 - **Inter fonctionnement** entre Ethernet 10Mb/s et 100Mb/s).

Réseaux locaux Ethernet

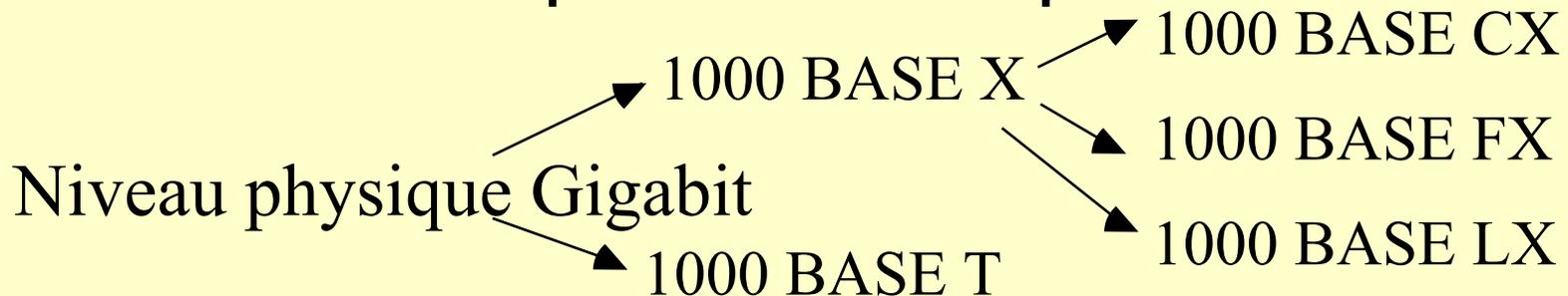


Ethernet:

les standards au Gigabit/seconde

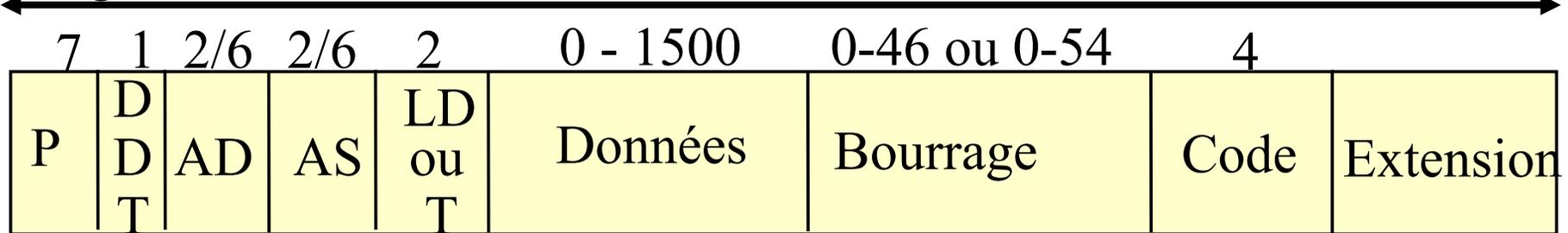
Introduction: Ethernet Gigabit

- Refaire une **multiplication par 10 du débit** (1995-1998).
- Pour aller vite récupération des deux technologies: **Ethernet 802.3 et Fibre Channel X3T11**.
- Utiliser la **technologie 0,3 microns** (interfaces à bas prix).
- Créer un réseau gigabit qui **apparaisse** du point de vue des couches supérieures comme un **réseau Ethernet habituel**.
 - . **Format** des trames identique.
 - . Niveau MAC **compatible** (adresses, diffusions, ...)
 - . Administration **identique** (10 , 100, 1000 Mb/s).
- Versions "**half duplex**" et "**full duplex**".



Niveau MAC : Ethernet Gigabit partagé IEEE 802.3z Half Duplex

Longueur min 520 octets en 1000 base T et 416 octets en 1000 base X

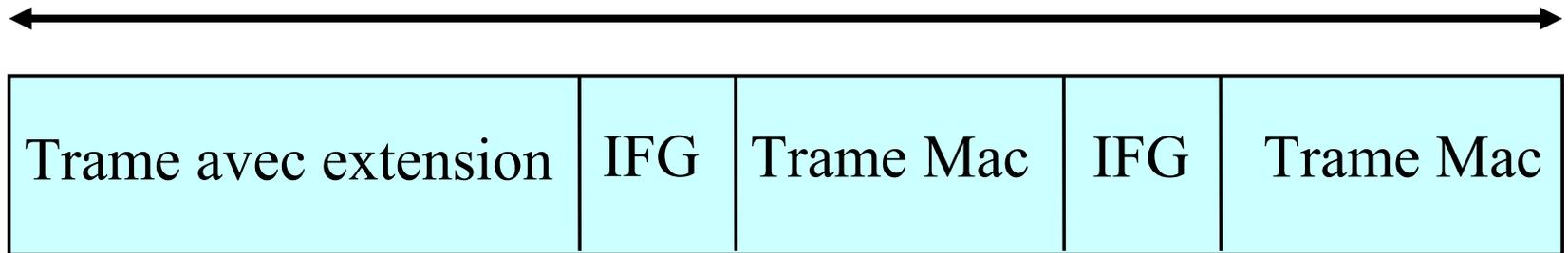


- **Format des trames inchangé** (compatibilité logicielle) => Nécessité de détecter les collisions sur la trame la plus courte.
- **Longueur min 512 bits à 1000 Mb/s** donne un délai de détection de collision de 512 nanosecondes => **trop court**.
- **Allongement de la trame minimum** au niveau physique.
- Une trame Mac de 64 octets est complétée si nécessaire par **bourrage (notion d'extension de trame)**.
- On atteint ainsi un diamètre de collision de 200 m : **les stations peuvent se trouver à 100 m d'un hub gigabit.**

Niveau MAC : Ethernet Gigabit

Rafales de trames ('Frame Bursting')

Durée maximum (5,4 trames de durée max)



- Transmission d'une **première trame** avec éventuellement bits d'extension pour acquérir la voie.
- Ensuite **émission d'une rafale de trames** (' frame burst ') sans repasser en mode acquisition pour une durée maximum de 5,4 trames de taille maximum.
- Les silences inter trames sont **garnis par des bits d'extension**.

Niveau MAC 802.3x : Contrôle de flux ("Flow Control")

- **Haut débit** => ne pas perdre de trames par écrasement dans les tampons d'entrée du récepteur .
- Introduction dans Ethernet Gigabit d'une technique de contrôle de flux au niveau liaison (mode full duplex).
- Une solution retenue très rustique de type arrêt et attente (X-On / X-Off).
- Une trame de contrôle MAC (8808) baptisée "Pause" (0001), permet à un destinataire de demander à un émetteur de suspendre pour un certain délai ses émissions (en nombre de slots, exemple 3).
- La même trame "Pause" avec un délai nul permet de mettre fin avant terme à l'arrêt.

	2	2	2	
Entête	Contrôle MAC x8808	Code Pause x0001	Durée de pause x0003	Bourrage
	Type/longueur	Donnés + Bourrage		

Niveau physique : Ethernet Gigabit 1000 Base X

| Standard 1000 BASE LX

- Laser ondes longues sur fibres monomodes ou multi modes (1300 nanomètres).
- Distance 550m à 3 km selon les fibres.

| Standard 1000 BASE SX

- Laser ondes courtes (850 nanomètres) sur fibres multi modes.
- Distance 250 à 550 m selon les fibres.

| Standard 1000 BASE CX

- Ethernet gigabit sur paires torsadées (2 paires STP Shielded Twisted Pairs)
- Distance 200m.

Niveau physique : Codage 1000 Base X

- Origine : Fibre Channel niveau 1 FC-1
- Objectifs du codage 8B/10B NRZ (origine IBM)
 - => **Minimisation du bruit** (des erreurs)
 - Maintenir "l'équilibre" i.e. le même nombre de bits à 1 que de bits à 0.
 - => **Amélioration de la synchro bit**
 - => **Détection d'erreurs**
 - => **Séparation données/contrôles**
 - Pour des données normales utilisateur **D-type**
 - Pour des données protocolaires **K-type** (Caractères spéciaux par exemple délimiteurs, signalisation)

Niveau physique : codage 1000 Base X 8B10B

- **Code 8B/10B: Représentation des octets 8 bits par des symboles 10 bits.**
 - 512 symboles pour les données (2 représentations par octet)
 - Quelques symboles pour la signalisation
 - Les autres symboles sont invalides (permet la détection d'erreurs)
- **RD "Running Disparity"**
- Indicateur de la disparité entre les 1 et les 0.
 - Si un groupe de bits à autant de 1 que de 0 => RD inchangée
 - Si un groupe de bits à plus de 1 que de 0 => RD positive
 - Si un groupe de bits à moins de 1 que de 0 => RD négative
 - Chaque donnée significative à deux représentations définies par des tables :L'une en cas de RD positive, L'autre en cas de RD négative En cas de RD inchangée la norme définit un des deux codes à utiliser.

Niveau physique : codage 8B10B

Exemple

- Exemple : Le caractère spécial (type K) Délimiteur appelé "virgule"

Octet x'BC' b'1011 1100'

Découpage 3 bits+5 bits 101 11100

Notation normalisée Zxx.yy

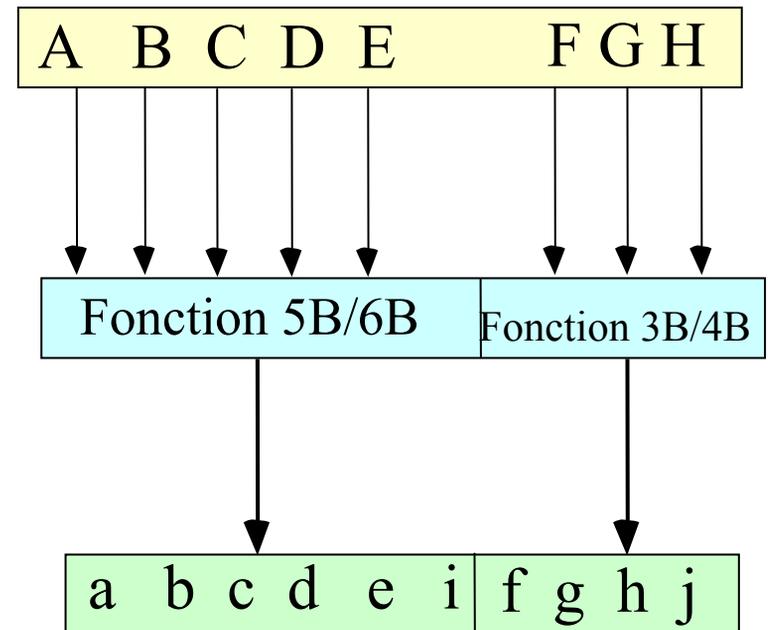
Z: Type K ou D Virgule : K28.5

xx:DEFGH décimal .yy:ABC en décimal

- Symboles émis sur 10 bits

avec RD négative 001111 1010

avec RD positive 110000 0101



Niveau physique : Ethernet Gigabit 1000 Base T

- **Support 4 paires torsadées de catégorie 5.**
- **Récupération des progrès** réalisés a propos de l'Ethernet 100
 - 100 Base T a montré qu'on peut transmettre à 125 Mb/s sur UTP 5.
 - 100 Base T4 a montré qu'on peut transmettre sur trois paires.
 - 100 base T2 a montré que l'on peut transmettre en PAM 5 simultanément dans les deux sens.
- **Transmission octets par octets**
 - Encodage initial (code correcteur d'erreur FEC forward error correction)
 - A chaque intervalle, transmission sur 4 paires d'un octet sous la forme de 4 symboles PAM5 (chaque symbole de valence 5 code 2 bits plus une information de code correcteur d'erreur).
 - Débit atteint $125 \text{ mbaud/s} \times 8 \text{ bits} = 1 \text{ gigabit/s}$.

Conclusion : Ethernet Gigabit

- Une **utilisation déjà importante** dans les réseaux locaux au niveau infrastructure (' backbone ').
- **Cartes réseaux sur PC à un prix accessible.**
- Le mode **half duplex** a été maintenu mais le standard a vocation à être **utilisé en mode full duplex.**
- Avenir de ce standard : la **connexion filaire** de stations de travail.

Réseaux locaux Ethernet



Ethernet:

les standards à 10 Gigabits/s

Introduction: Ethernet 10 Gigabits

- **Groupe de travail IEEE** à partir de 1999. Publication de la norme IEEE802.3 ae en 2002. **Fin des travaux 2006**
- **Objectif poursuivi:** créer un réseau compatible Ethernet.
 - . **Format** des trames identique (adressage, tailles min et max, ...)
 - . Compatibilité fonctionnelle norme 802.3 (contrôle de flux, ...)
- **Trois particularismes**
 - Version "**full duplex**" **uniquement**.
 - Distance possible sur fibre monomode **40 km**.
 - Compatibilité d'une version 10G avec le réseau longue distance sur fibre optique : **SONET OC-192c / SDH VC4-64C**
- **Niveau physique** : codages X, R, W médium S, L, L4, E, T

Niveau physique: Les codages

- 10G BASE X utilise le codage **8B/10B**.
- 10G BASE R utilise le codage **64b/66b**.
- 10G Base W utilise comme support de communication des conteneurs SONET OC192 ou SDH VC 64 .

Niveau physique: Fibres optiques

■ 10G Base S

- Deux fibre multimodes 850 nanomètres série.
- Distance maximum 65 mètres

■ 10G Base L4

- Deux fibre multimodes 1310 nanomètres multiplexage en longueur d'onde (utilisation du multiplexage en longueur d'onde WDM Wavelength Divison Multiplexing).
- Distance maximum 300 mètres

■ 10G Base L

- Deux fibre monomodes 1310 nanomètres
- Distance maximum 10 kilomètres

■ 10G Base E

- Deux fibre monomodes 1550 nanomètres
- Distance maximum 40 kilomètres

Exemples d'Ethernet 10G sur fibre

- En combinant un choix de codage et un choix de fibre.
- 10GBase-SR 850-nm serial LAN Multimode 65
- 10GBase-LX4 1,310-nm WDM LAN Multimode 300
- 10GBase-LR 1,310-nm serial LAN Single-mode 10,000
- 10GBase-ER 1,550-nm serial LAN Single-mode 40,000
- 10GBase-SW 850-nm serial WAN Multimode 65
- 10GBase-LW 1,310-nm serial WAN Single-mode 10,000
- 10GBase-EW 1,550-nm serial WAN Single-mode 40,000

Niveau physique: Ethernet 10G Base T

- Le standard à 10 GB sur paires torsadées
- Utilisation de 4 paires torsadées UTP catégorie 6 ou 7 (Class E ou Class F).
- Distances maximum dépendantes de la paire utilisée.
 - 100 m sur catégorie 7 (class F)
 - 55 m sur catégorie 6 (class E)
- Mode full duplex avec annulation d'écho.
- Code PAM 10 , 10 niveaux codent 3 bits.
- Rapidité de modulation 833 Mégabaud.
- Débit $4 \text{ paires} \times 833 \text{ mégabaud} \times 3 \text{ bits/ baud} = 10 \text{ GB}$.
- Difficultés de mise au point.

Conclusion : Ethernet 10 Gigabit



- Encore en cours de mise au point.
- Des produits déjà diffusés.
- Pour l'instant un standard pour opérateurs ou réseaux très importants.

Réseaux locaux Ethernet



Ethernet:

L'auto négociation

Caractéristiques générales de l'auto-négociation

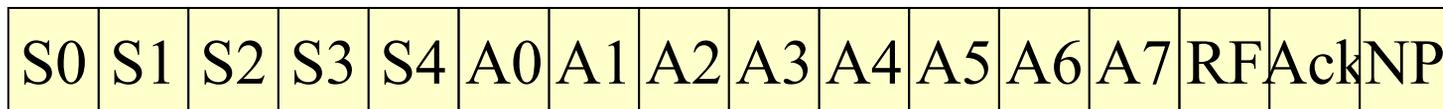
- L'auto-négociation sert à **déterminer la meilleure option possible de communication** entre deux extrémités d'une voie sur paires torsadées.
- Il fonctionne par **échange des capacités de communication** entre partenaires Ethernet (entre deux stations connectées directement ou entre une station et un répéteur ou un commutateur).
- La négociation réalisée par un protocole situé au **niveau physique**.
- Uniquement définie pour les **versions Ethernet paires torsadée** à partir de 802.3u Ethernet 100.
- Ce protocole est exécuté à **l'initialisation d'une voie de communication** ou lors d'une **restauration manuelle** d'une liaison.
- Origine **NEC** Nwau, normalisation **IEEE 802.3 u** (1995)

Tableau des modes de communication négociables

Priorité	Type	Débit
1	10 Base T Half duplex	10 Mb/s
2	10 Base T Full duplex	2x10 Mb/s
3	100 Base TX Half-duplex	100 Mb/s
4	100 Base T4 Half-duplex	100 Mb/s
5	100 Base T2 Half-duplex	100 Mb/s
6	100 Base TX Full-duplex	2x100 Mb/s
7	100 Base T2 Full-duplex	2x100 Mb/s
8	1000 Base T Half-duplex	1000 Mb/s
9	1000 Base T Full duplex	2X1000 Mb/s

Fonctionnement de l'auto-négociation

- En 10 base T émission initiale d'une **séquence d'impulsions (NLP 'Normal Link Pulse')** puis entretien de l'état opérationnel par des NLP chaque 16 milliseconde.
- L'auto-négociation transforme à l'initialisation les signaux NLP en signaux baptisés **FLP ('Fast Link Pulse')**, qui véhiculent des mots de 16 bits **LCW ('Link Code Word)** qui codent le niveau de communication possible.



- **Le LCW de base**
 - S0 à S4 : Sélecteur de réseau local (code 00001 pour Ethernet)
 - A0 : 10 Base T HD, A1 : 10 Base T FD, A2 : 100 Base TX HD,
 - RF : Remote Fault, signalisation d'erreur à l'extrémité distante
 - Ack : Acquiescement de réception d'un mot LCW de 16 bits reçu.
 - NP : Next Page existence d'un autre mot à suivre .
- Un système distant qui possède les fonctions d'auto négociation acquiesce et **propose son propre niveau.**

Modes de détection parallèle

- En l'absence du protocole d'auto négociation (pas de signaux FLP) possibilité **de détection parallèle** ('parallel detection'):
 - Si un système ne sait générer que le signal NLP le mode de communication sélectionné est le 10 Base T half duplex.
 - Observation des signaux générés par le partenaire: si un partenaire génère des signaux en 100 base TX ou 100 Base T4, la forme caractéristique de ces signaux permet à un mécanisme dit de détection parallèle de se positionner quand même à 100 Mb/s.
 - Existence de problèmes possibles avec l'auto négociation (sélection d'un niveau trop bas) ou problèmes avec le mode de détection parallèle.
- L'auto négociation en Ethernet gigabit est **modifiée (nouveau LCW, négociation pour l'utilisation du contrôle de flux)** .

Conclusion : Ethernet



- Le standard en réseau local filaire qui a effacé tous les autres.
- Un ensemble de concepts qui ont considérablement évolués. En fait Ethernet a été 'réinventé' plusieurs fois ce qui a assuré sa survie et son succès.
- Un avenir assuré pour ce standard: prochaine étape envisagée 100 Gigabits/seconde ?

Bibliographie



- Charles E. Spurgeon, ' Ethernet : the definitive guide ' , Oreilly, 2000
- Alexis Ferréro, ' Les réseaux locaux commutés et ATM ' , InterEdition, 1998
- Sites web :
 - Gigabit alliance <http://www.10gea.org/>

Réseaux locaux partagés



Réseaux locaux sans fils (Wireless LAN)

IEEE 802.11 ' WIFI '

Généralités

Niveau liaison

Niveau physique

Généralités Wifi: différentes catégories de réseaux sans fils

- 1) Réseaux personnels sans fils (WPAN)
 - Bluetooth (IEEE 802.15.1), HomeRF, ZigBee IEEE (802.15.4), Infrarouges

- 2) Réseaux locaux sans fils (WLAN)
 - WiFi IEEE 802.11, HiperLAN, DECT

- 3) Réseaux métropolitains sans fils (WMAN)
 - Norme IEEE 802.16 (boucle locale radio) Wimax

- 4) Réseaux étendus sans fils (WWAN)
 - GSM (*Global System for Mobile*), GPRS (*General Packet Radio Service*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*).

Généralités Wifi (‘Wireless Fidelity’)

- **Recherches** sur les réseaux locaux sans fils depuis le début des années **1970**.

- **Normalisation** wifi: fin des années **1990**.

- **Avantages** du sans fil

- **Ne pas avoir à câbler** un bâtiment.

- Plus de **souplesse** et de **mobilité**.

- **Déploiement** des réseaux Wifi

- Réseaux **domestiques**.

- En **entreprise**.

- Lieux de **fort passage** (‘hotspots’).

- **Fournisseurs** d’accès sans fils WISP ‘Wireless Internet Service Provider’

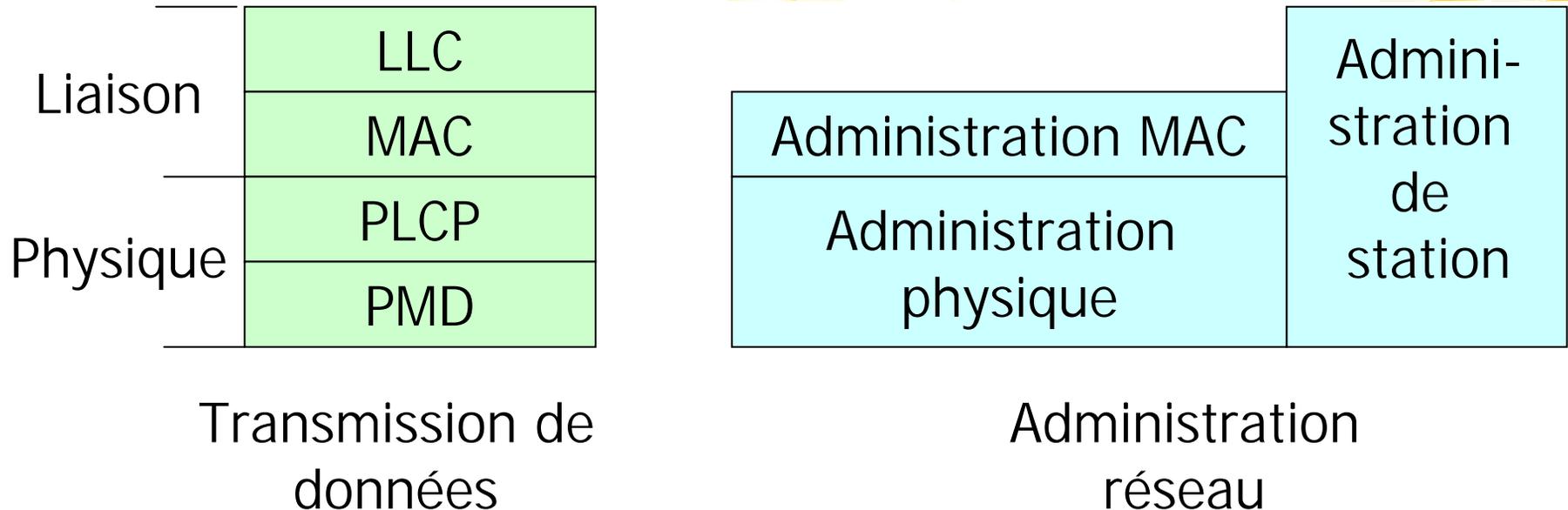
Généralités WIFI:

Quelques éléments d'architecture

- 1) **WIFI : un réseau local radio.**
 - Définition sur les deux niveaux **physique** et **liaison**.
- 2) **WIFI : deux organisations architecturales.**
 - Le mode **infrastructure** (centralisé).
 - Le mode **ad 'hoc** (distribué).
- 3) **WIFI : deux protocoles différents d'accès au médium.**
 - **PCF** 'Point Coordination Function' (en coopération).
 - **DCF** 'Distributed Coordination Function' (en compétition).
 - Pouvant être utilisés simultanément par une station.
- 4) **WIFI : différents niveaux physiques** selon le débit, le codage, la bande de fréquences utilisée.
 - 802.11, 802.11a , **802.11b** , **802.11g**, en cours 802.11n.
- 5) **Consortium de développement : WIFI Alliance**

Généralités WI FI :

Le modèle de référence WIFI



- LLC ' Logical Link Control '.
- MAC 'Medium Access Control'.
- PLCP 'Physical Layer Convergence Protocol'.
- PMD 'Physical Medium Dependent'.
- Administration physique (Physical Management).
- Administration MAC (MAC Management).
- Gestion de Station (Station Management).

Réseaux locaux partagés wifi

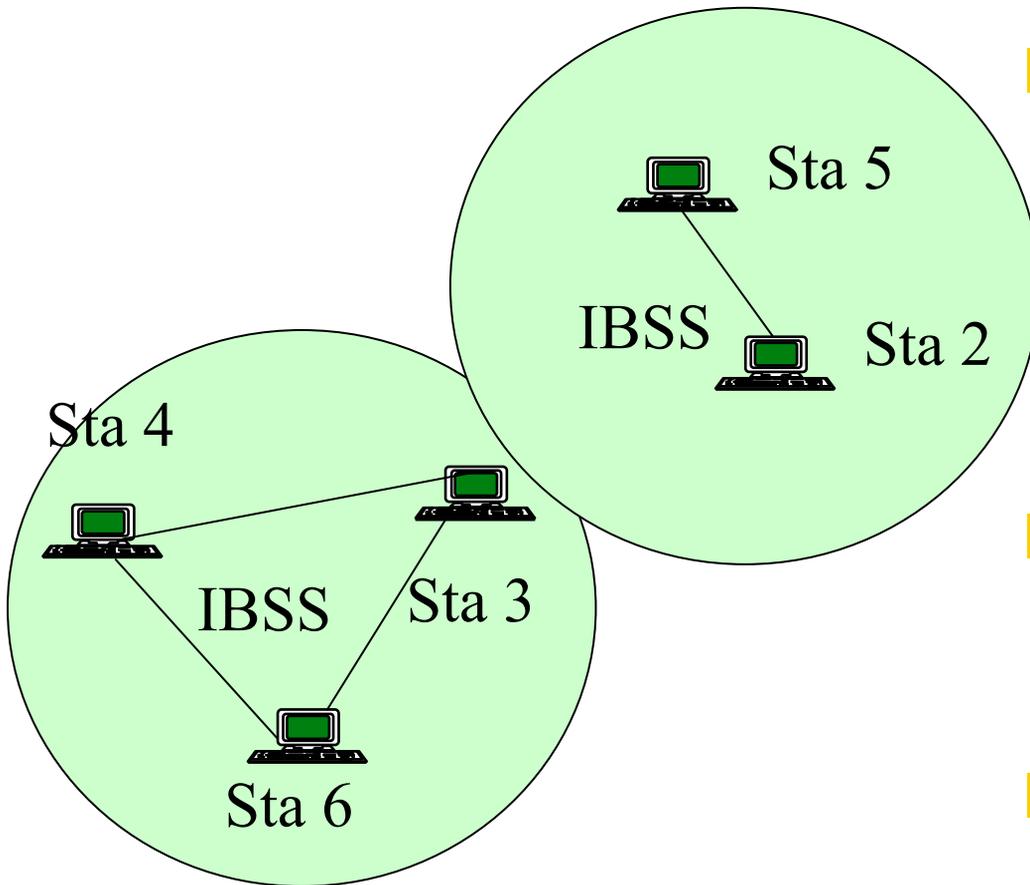


LE NIVEAU LIAISON

'MAC Medium Access Control'

Mode ad 'hoc
Mode infrastructure

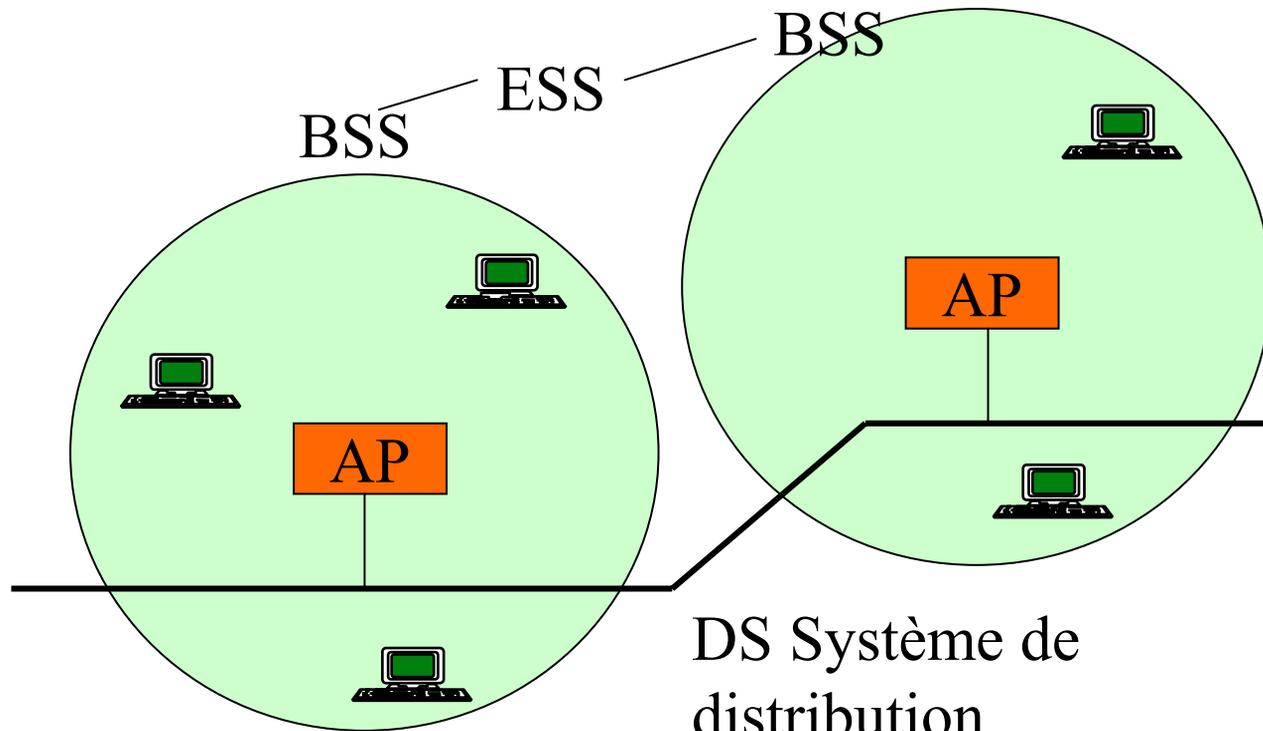
Le niveau liaison Wifi : Le mode ad'hoc (distribué)



- IBSS 'Independent Basic Service Set' : ensemble de stations avec coupleurs sans fils, communicantes dans la même bande.
- Terminologie: mode ad 'hoc, 'peer to peer'
- Protocole DCF : Distributed Coordination Function.

Le niveau liaison Wifi :

Le mode ' infrastructure ' (centralisé)



- AP 'Access Point' commutateur.
- Station de travail avec un coupleur WIFI.
- BSS (Basic Service Set): un seul AP.
- ESS ('Extended Service Set') : plusieurs AP connectés par un autre réseau (réseau Ethernet ou sans fil).
- Changement de point d'accès: **handover/roaming** (itinérance).

Le niveau liaison Wifi : DCF

' Distributed Coordination Function '

- 1) Protocole en **compétition** avec écoute (CSMA).
- 2) Ajournement **non persistant**.
- 3) **Détection** de collisions par accusé de réception.
- 4) **Retransmission** sur collision (binary backoff).
- 5) Gestion de la **fragmentation**.
- 6) Pas de **gestion de connexion**.
- 7) Pas de **contrôle de flux**.
- 8) Pas de garantie de livraison **sans erreurs**.
- 9) Pas de **qualité de service** (en version de base)

Le niveau liaison Wifi : DCF

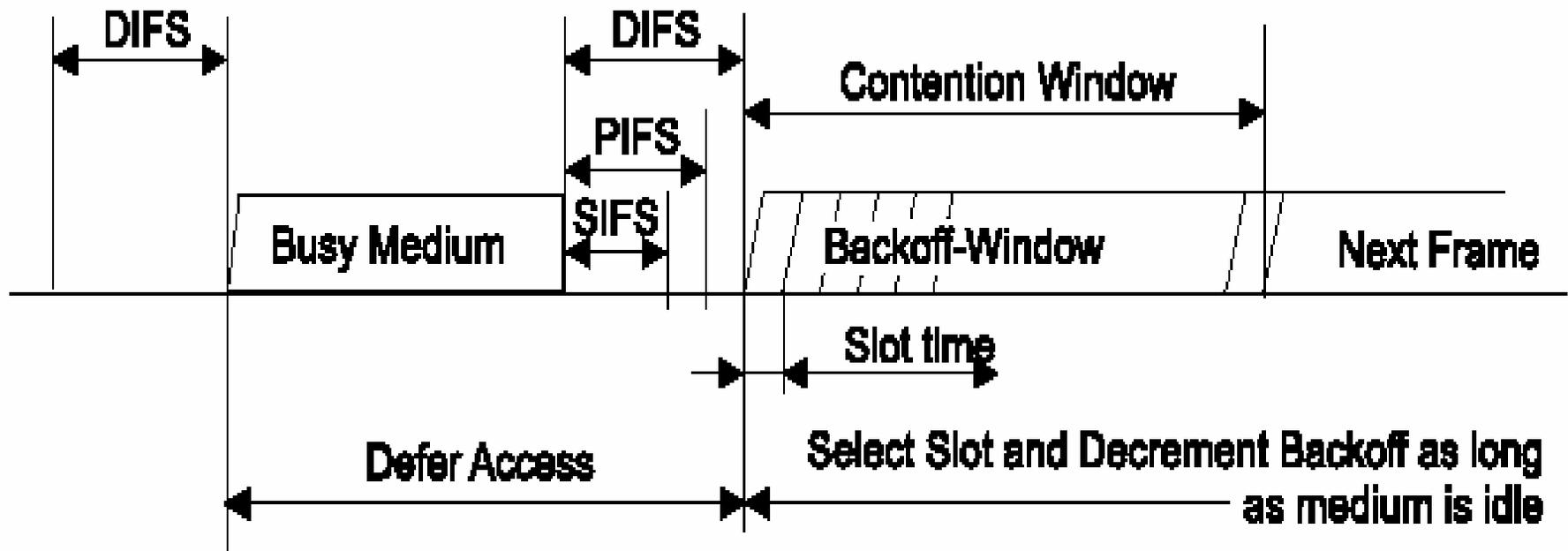
Ecoute et ajournement non persistant

- 1) **Ecouter** la voie, **transmettre** si la voie est libre.
- 2) Si la voie est **occupée** choisir un intervalle **d'attente aléatoire ('backoff')** dans l'intervalle $[0, CW]$ (CW contention window).
- 3) **Décompter** des intervalles de temps (tranche canal 'Slot Time) quand le médium est libre.
- 4) Le décompte est **suspendu** quand le médium redevient occupé.
- 5) Quand l'intervalle d'attente devient **nul et que la voie est libre** commencer à **émettre** (une trame de données ou de contrôle par exemple RTS).

Le niveau liaison Wifi : DCF

Diagramme d'écoute et d'ajournement

Immediate access when medium is free \geq DIFS Schéma extrait de la norme 802.11

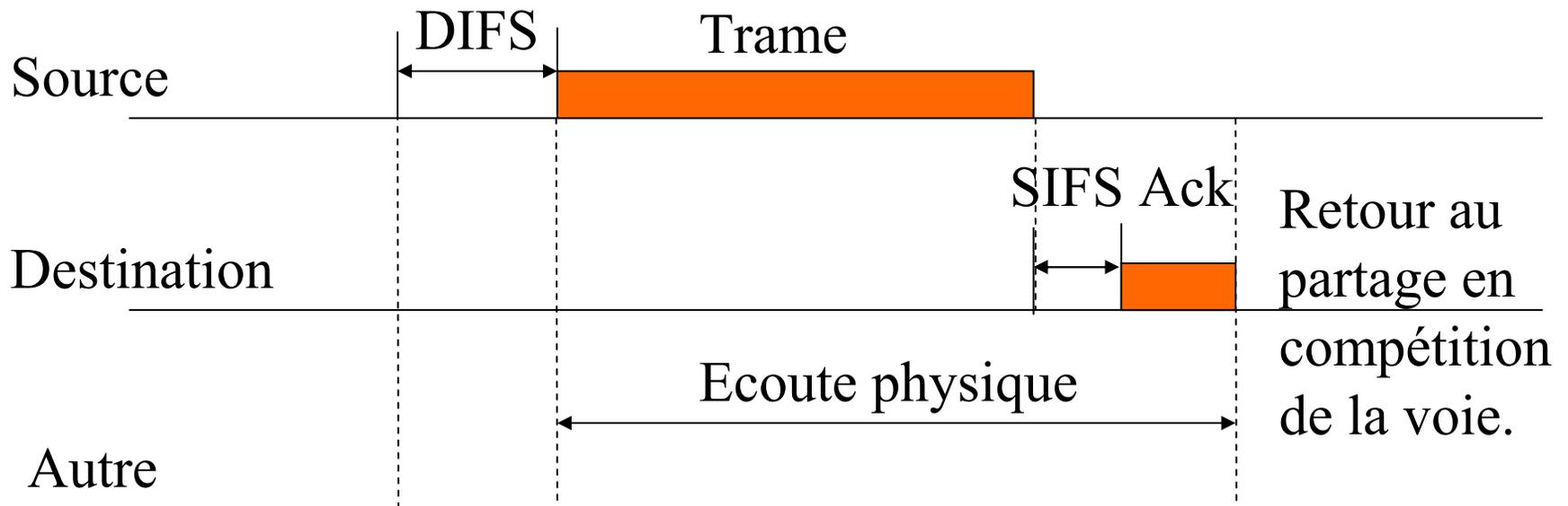


Notions utilisées

- Silence inter trame (IFS Inter-Frame Spacing)
DIFS: Distributed IFS (50 μ s); PIFS: Point IFS(30 μ s); SIFS: Short IFS (10 μ s)
- Fenêtre de collision CW ('Contention Window')
- Tranche canal ('Slot Time') 20 μ s
- Attente en nombre entier de tranches ('Backoff')

Le niveau liaison Wifi : DCF

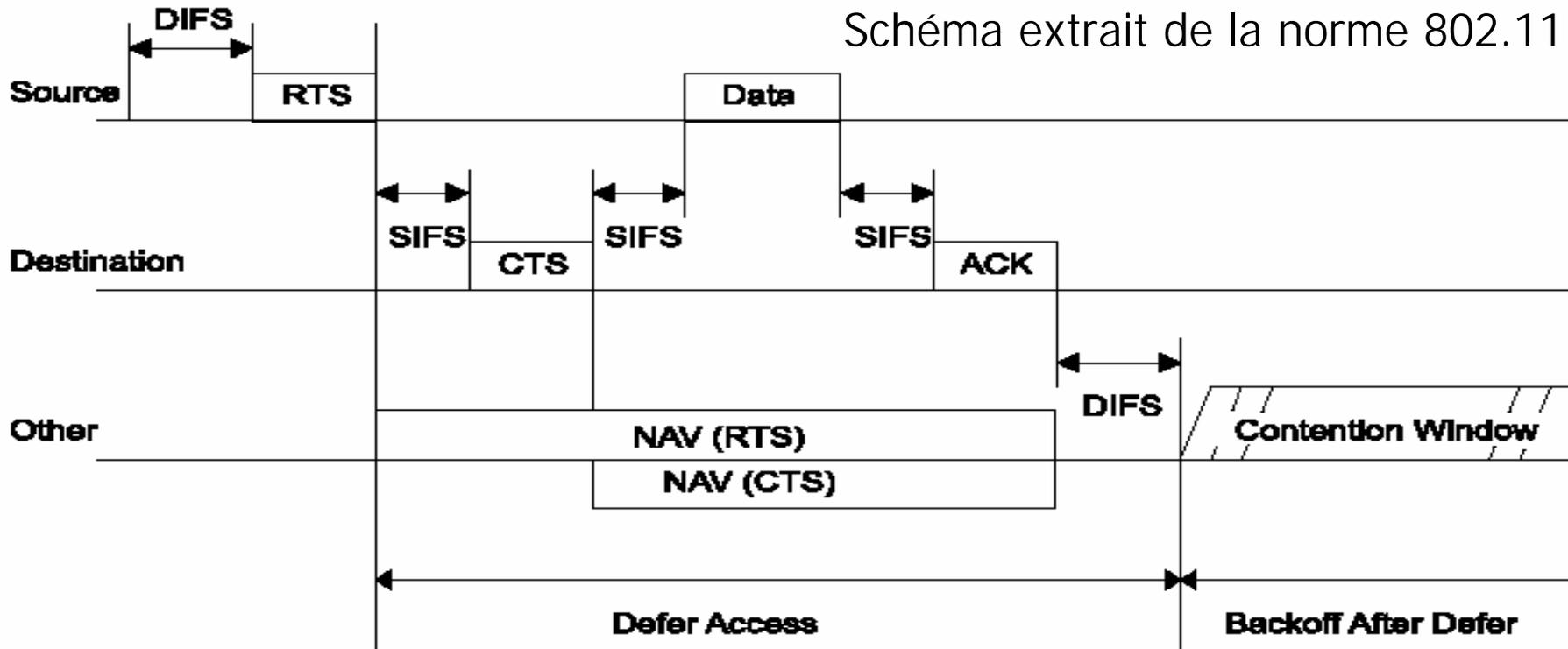
Transmission directe d'une trame



- **Acquittement positif ACK** obligatoire après un silence SIFS (protocole PAR 'Positive Acknowledgment Retry' ou encore ARQ Automatic Repeat ReQuest).
- **Mécanisme d'écoute physique** pour une autre station.

Le niveau liaison Wifi : DCF

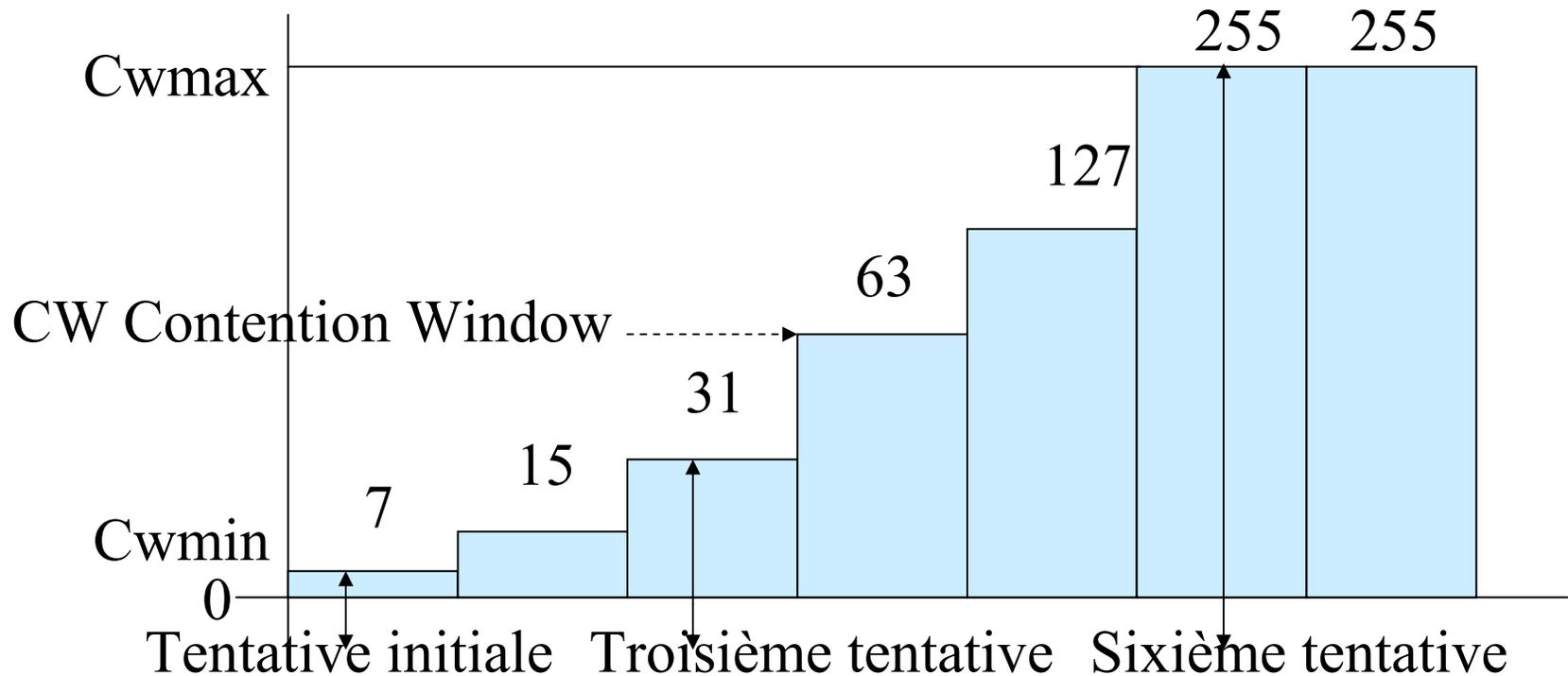
Evitement des collisions : CSMA/CA



- Echange RTS CTS (Request To Send/Clear To Send) pour une trame données.
- Utilisation des silences courts SIFS (l'échange est prioritaire)
- Acquiescement positif ACK obligatoire.
- Mécanisme d'écoute virtuelle (indicateur NAV pour une autre station).

Le niveau liaison Wifi : DCF

L'algorithme du retard binaire



Attente = $\text{Random}() * \text{ST}$ (Backoff Time).

Random = Entier aléatoire uniformément distribué sur $[0, \text{CW}]$.

CW = Entier entre CWmin CWmax qui double à chaque tentative.

ST = Valeur caractéristique du niveau physique (Slot Time).

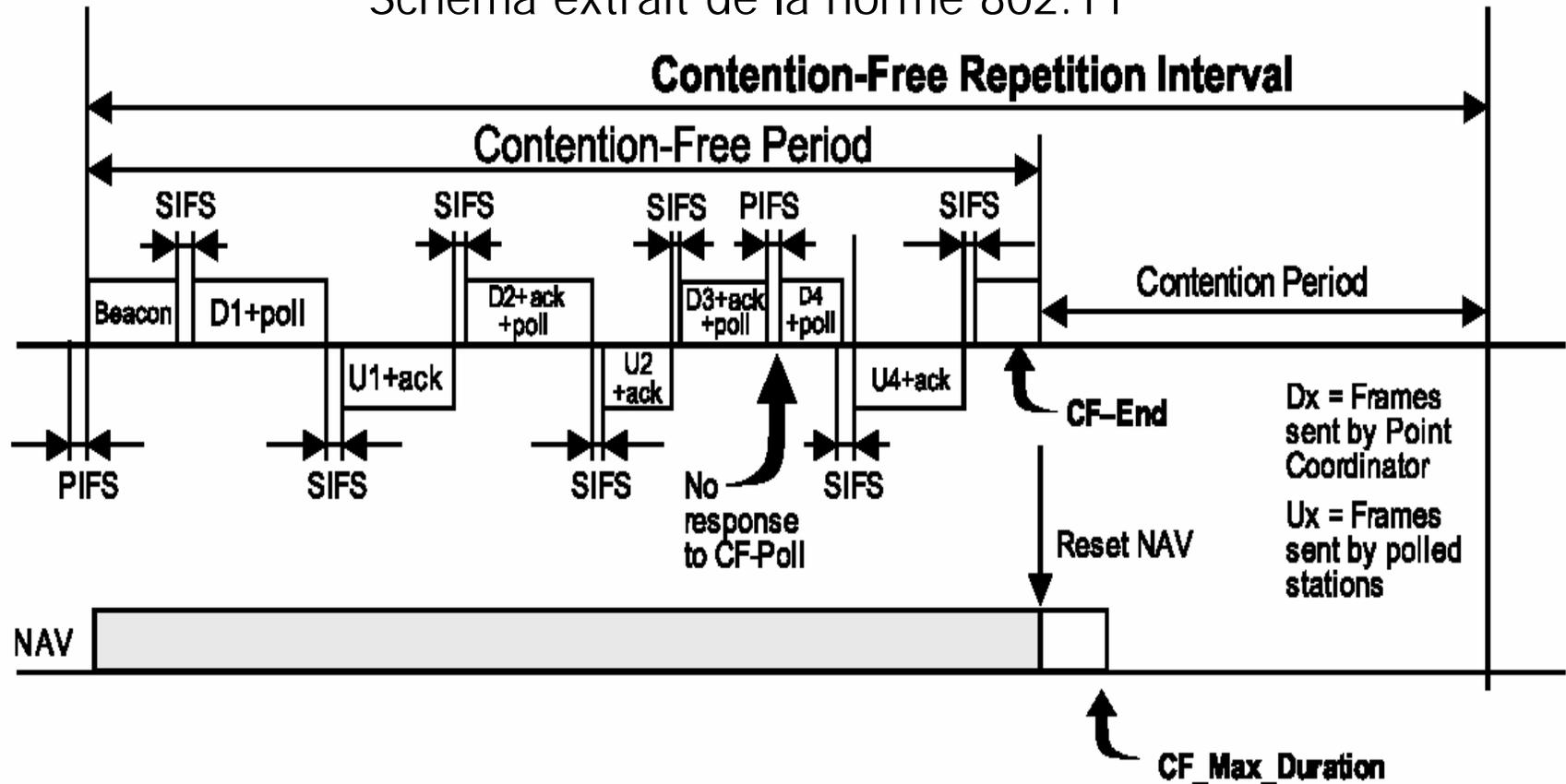
802.11a et g : $\text{cwmin}=15$ $\text{cwmax}=1023$; **802.11b** : $\text{cwmin}=31$ $\text{cwmax}=1023$

Le niveau liaison Wifi : PCF ' Point Coordination Function '

- 1) Fonctionnement en **scrutation** ('polling') par le PC ('**P**oint **C**oordinator').
- 2) Une station **émet** si elle est **autorisée par le PC**.
- 3) Le PC **sélectionne** une station en plaçant son adresse dans la trame.
- 4) Les trames sont acquittées. Si l'acquittement ne revient pas le **PC ou la station effectuent la retransmission**.
- 5) **PCF** a plutôt été destiné à des échanges à **qualité de service**.

Le niveau liaison Wifi : PCF Protocole de scrutation

Schéma extrait de la norme 802.11



- Intervalle de répétition: mode PCF (contention free) puis DCF.
- PIFS puis trame Beacon : ouverture d'un intervalle sans collision (mode PCF)
- CF-end fin de séquence Poll Ack sous contrôle du PC.

Le niveau liaison Wifi : autre fonction Fragmentation

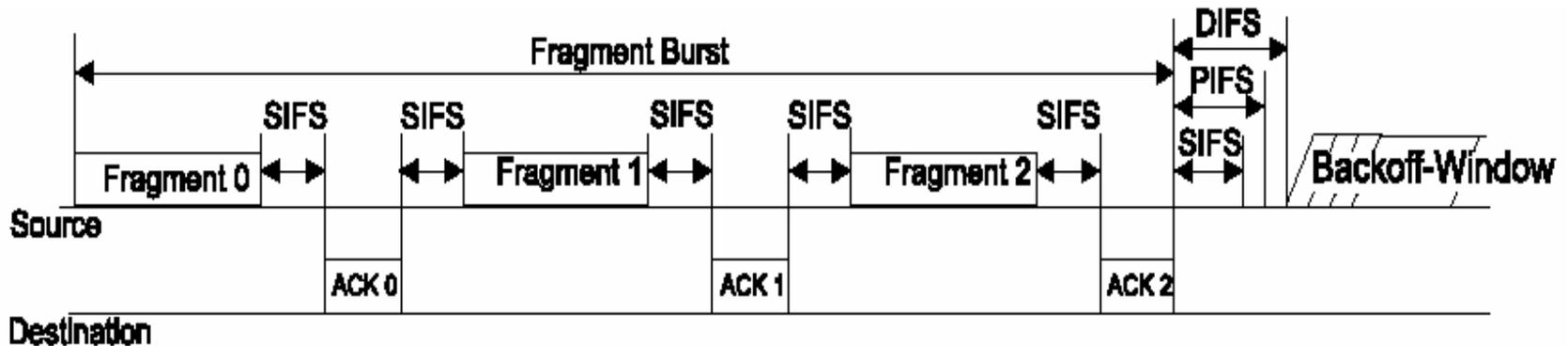
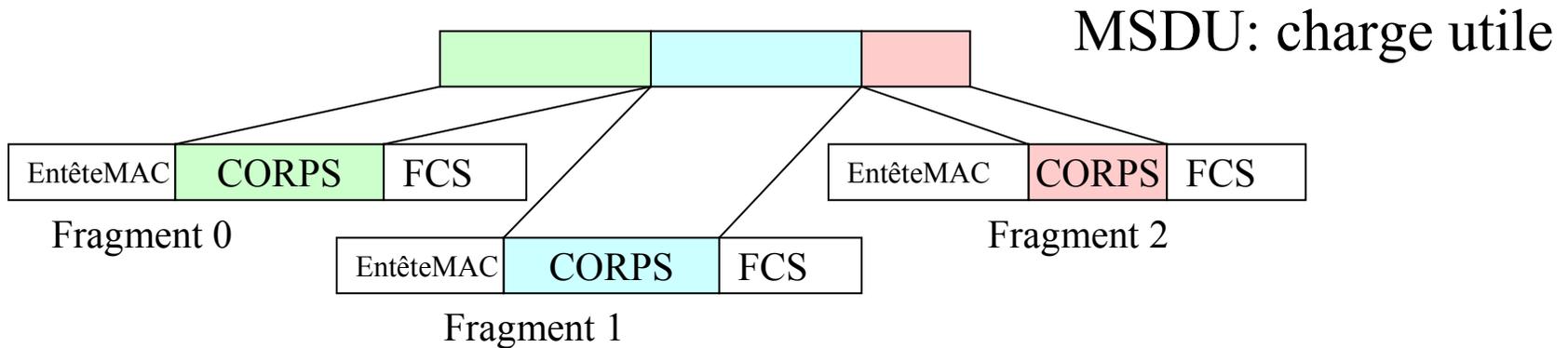
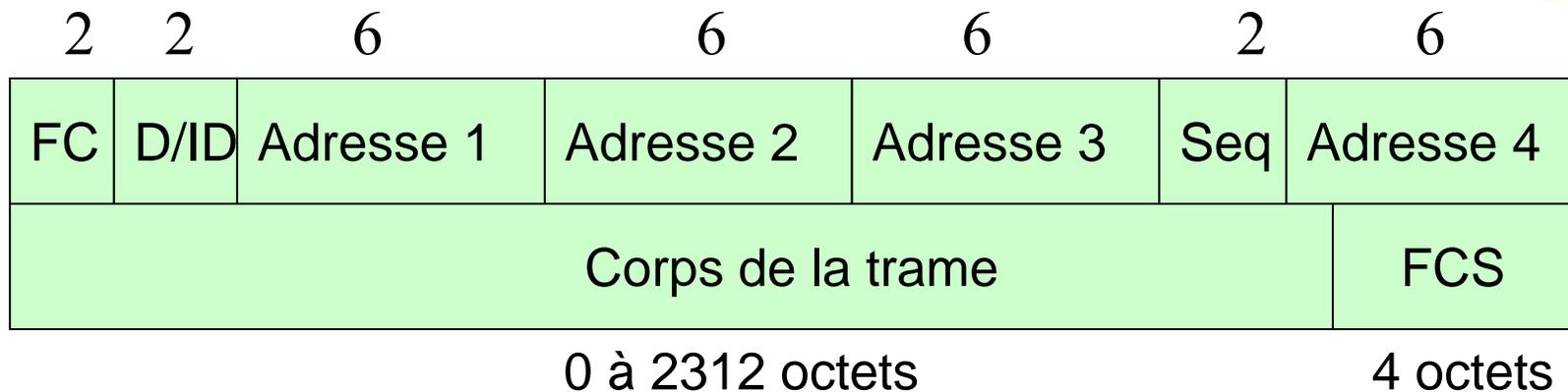


Schéma extrait de la norme 802.11

Le niveau liaison Wifi : Format de trame (MAC)



- **1) FC** (Frame Control): version de protocole, type de trame ...etc.
- **2) Durée / ID** : Durée d'utilisation du canal de transmission.
- **3) Champs adresses** : Une trame peut contenir jusqu'à 4 adresses (mode ad'hoc adresse 1 destination et adresse 2 source).
- **4) Contrôle de séquence** : pour la fragmentation (numéro de fragment sur quatre bits et numéro de séquence de la trame sur douze bits).
- **5) Corps de la trame** : charge utile d'au maximum 2312 octets.
- **6) FCS** (Field Check Sequence): somme de contrôle de niveau MAC : $x^{32} + x^{26} + x^{22} + x^{16} + x^2 + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1^{13}$

Approfondissement: la zone contrôle de trame (FC)

Version (2 bits)		Type (2 bits)		Sous-type (4 bits)			
To DS (1)	From DS (1)	More Frag (1)	Retry (1 bit)	Power mngt (1)	More data(1)	WEP (1 bit)	Order (1 bit)

- **1) Version du protocole:** Actuellement 0 en première version.
- **2) Type et sous type:** Définition du type de la trame (2 bits + 4 bits).
- **3) To et From DS (Distribution System) :** Trame vers ou en provenance du système de distribution (AP point d'accès). Les 2 bits à 0 mode Ad 'hoc.
- **4) More :** Il reste des fragments à émettre (bit more de la fragmentation).
- **5) Retry:** La trame est une retransmission d'une trame précédente erronée.
- **6) Power management :** A 1 la station entre en mode économie.
- **7) More data :** A 1 des données sont à émettre vers une station en économie.
- **8) WEP :** A 1 la trame est chiffrée en WEP (Wireless Equivalent Privacy).
- **9) Order :** Trame de la classe de service strictement ordonné.

Approfondissement: quatre cas de transmission en wifi

- **Cas 1** (mode ad'hoc): Transmission **directe** entre deux stations (dans un IBSS).
- **Cas 2** (mode infrastructure) : Transmission d'une **station vers le point d'accès** (qui doit ensuite relayer vers une station destinataire).
- **Cas 3** (mode infrastructure) : Transmission par un **point d'accès** d'une trame vers son **destinataire**.
- **Cas 4** (mode infrastructure avec réseau de distribution sans fil): Transmission **intermédiaire** d'une trame **d'un point d'accès à un autre point d'accès**.

Approfondissement: rôles des adresses MAC

Cas	To DS	From DS	Adresse 1	Adresse 2	Adresse 3	Adresse 4
1	0	0	DA	SA	BSSID	N/A
2	1	0	BSSID	SA	DA	N/A
3	0	1	DA	BSSID	SA	N/A
4	1	1	RA	TA	DA	SA

- Toutes les adresses sont au format IEEE 802 sur 48 bits.
- DA (Destination Address) : Adresse destination .
- SA (Source Address) : Adresse source.
- BSSID : Adresse du 'Basic Service Set' soit l'adresse MAC de l'AP (mode infrastructure) soit l'adresse de l'IBSS (mode ad 'hoc).
- RA : adresse de l'AP destinataire (dans le système de distribution sans fils).
- TA : adresse de l'AP source (dans le système de distribution sans fils).
- N/A : Non applicable.

Réseaux locaux partagés wifi



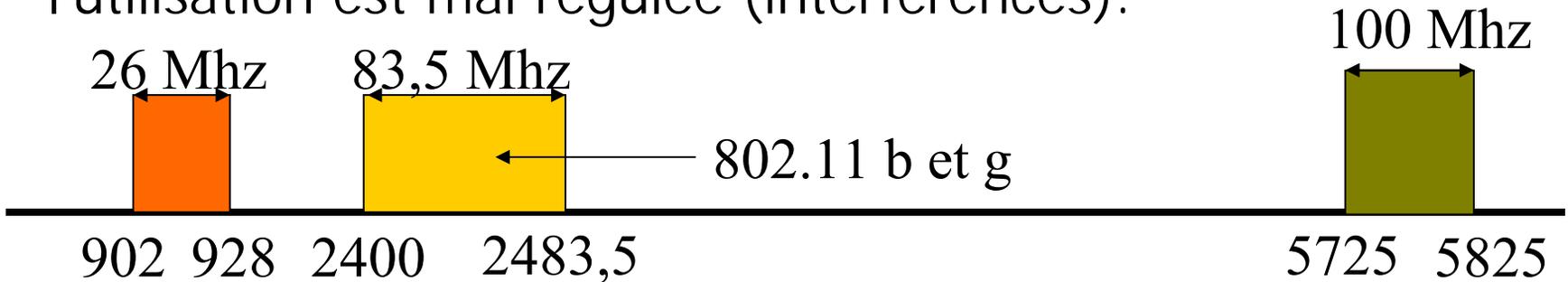
Le niveau physique

802.11 b

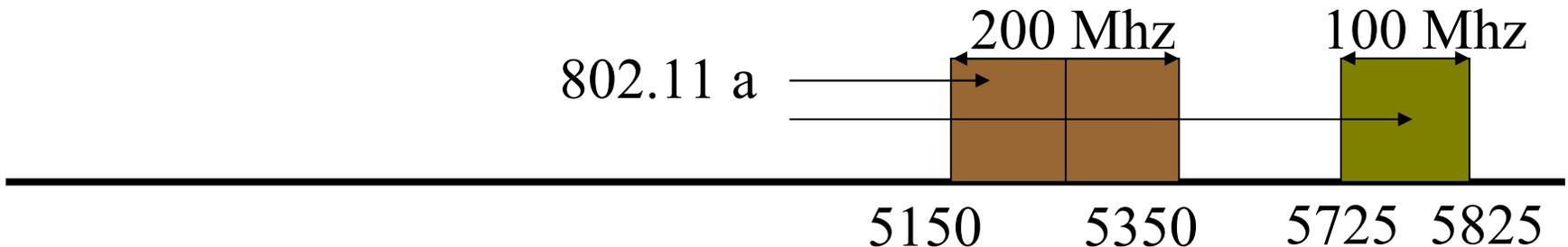
802.11 g

WIFI niveau physique : bandes de fréquences utilisées

■ Bandes de fréquences "ISM" (Industrie /Scientifique /Medicale), aucune autorisation n'est nécessaire mais l'utilisation est mal régulée (interférences).



■ Bande de fréquences "U-NII" (Unlicensed-National Information Infrastructure). IEEE 802.11 a



WIFI niveau physique :

Principaux standards

- IEEE 802.11 (1997) : 1 et 2 Mb/s (ISM 2,4 Ghz).
- **IEEE 802.11b** (1999) : 1, 2, 5.5, 11 Mb/s
(ISM 2,4 Ghz)
- IEEE 802.11a (2001) : 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mb/s (U-NII 5Mhz).
- **IEEE 802.11g** (2003) : 1,2, 5.5, 11,6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mb/s (ISM 2,4 Ghz) Compatible 802.11b
- IEEE 802.11n : En développement.

Réseaux locaux partagés wifi : Niveau physique



Le niveau physique wifi
selon la norme 802.11b

Niveau physique 802.11b :

Principales caractéristiques

1) **IEEE 802.11 (1997)** : Débits 1 Mb/s ('Basic Rate') et 2 Mb/s ('Extended Rate') selon trois codages,

- **FHSS** ('Frequency Hopping Spread Sequence')

- **DSSS** ('Direct Sequence Spread Spectrum')

- **IR** (Infra rouge).

2) **IEEE 802.11 b (1999)**: **Amélioration des codages**

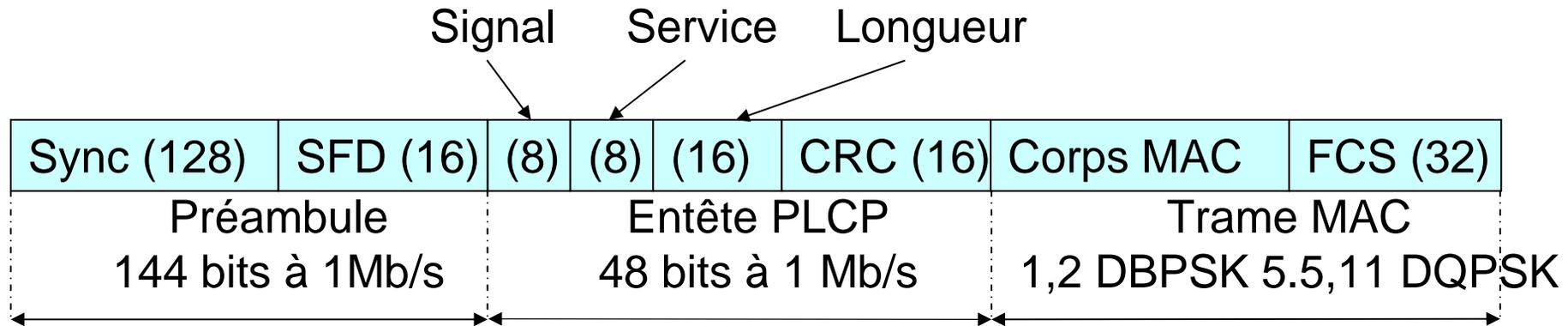
802.11 1997 (baptisés HR/DSSS ('High rate')) pour atteindre les débits de 5,5 Mb/s et 11 Mb/s (Enhanced rates).

3) **802.11b** : **Adaptation du débit** (technique de codage) en fonction du rapport signal à bruit ('variable rate shifting').

4) **802.11b** : '**Indication**' des distances en intérieur : 11 Mbit/s (30 à 45 m) ; 5,5 Mbit/s (45 à 75 m) ; 2 Mbit/s (75 à 100 m) ; 1 Mbit/s (100 à 300 m).

5) **802.11b** : **Utilisation de la bande ISM 2,4 à 2,4835²Ghz.**

Le niveau physique WIFI 802.11 b : Format des trames DSSS



■ Préambule ' Preamble ' :

Synch (128 bits): Séquence 0101 ... (128 bits entête normal, 56 bits entête court).

SFD (16 bits Start Frame Delimiter): Délimiteur début F3A0 ou 1111 0011 1100 0000

■ PLCP ' Physical Layer Convergence Protocol ' .

Signal (8 bits): débit en centaine Kb/s hexa 0A, 14, 37, 6E pour 1, 2, 5,5, 11 Mb/s.

Service (8 bits) : à 0.

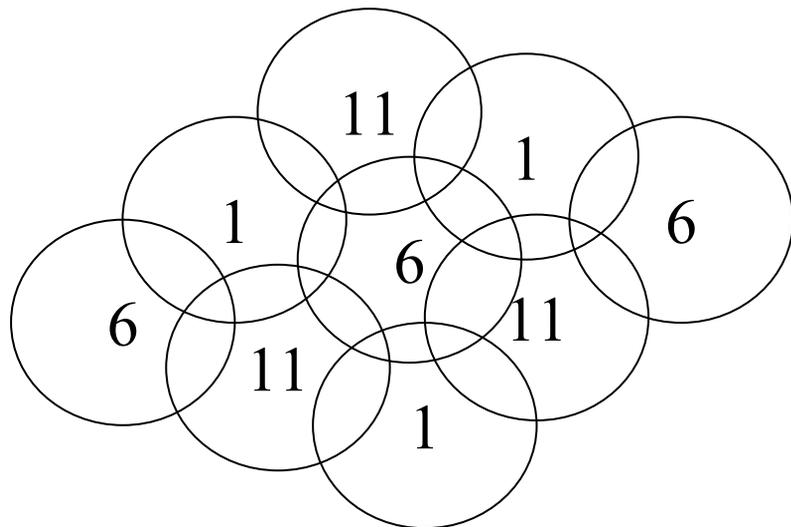
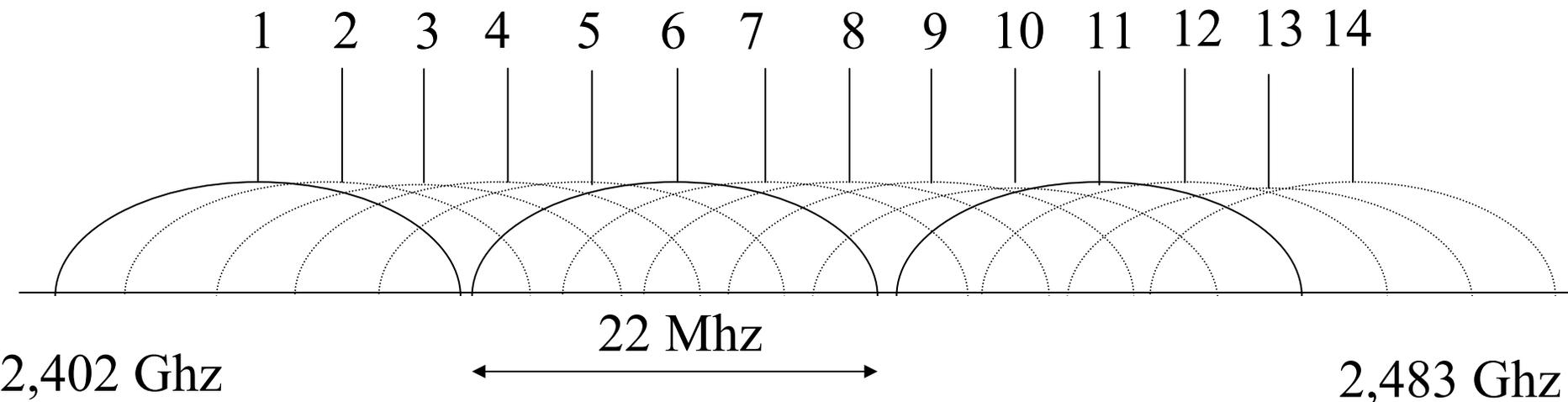
Longueur (16 bits): de la trame en octets (pour déterminer la fin).

Header Error Check Field : CRC (16 bits) sur l'entête PLCP selon

$$G(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

■ Trame de niveau MAC avec code polynomial FCS.

WIFI 802.11b : Le découpage en canaux de la bande 2,4 Ghz



- Trois canaux disjoints dans la bande 2,4 Ghz
- Une utilisation des trois canaux en mode cellulaire.

Niveau physique 802.11b :

Codages et modulations

Débit en b/s	Nb bits codés par symbole	Longueur du symbole	Débit en symboles /s	Modulation
1 Mb/s	1 bit	11 bits code Barker	1 Méga symboles /s	DBPSK
2 Mb/s	2 bits	11 bits code Barker	1 Méga symboles /s	DQPSK
5,5 Mb/s	4 bits	8 signaux code CCK5,5	1,375 Méga symboles /s	QPSK
11 Mb/s	8 bits	8 signaux code CCK11	1,375 Méga symboles /s	QPSK

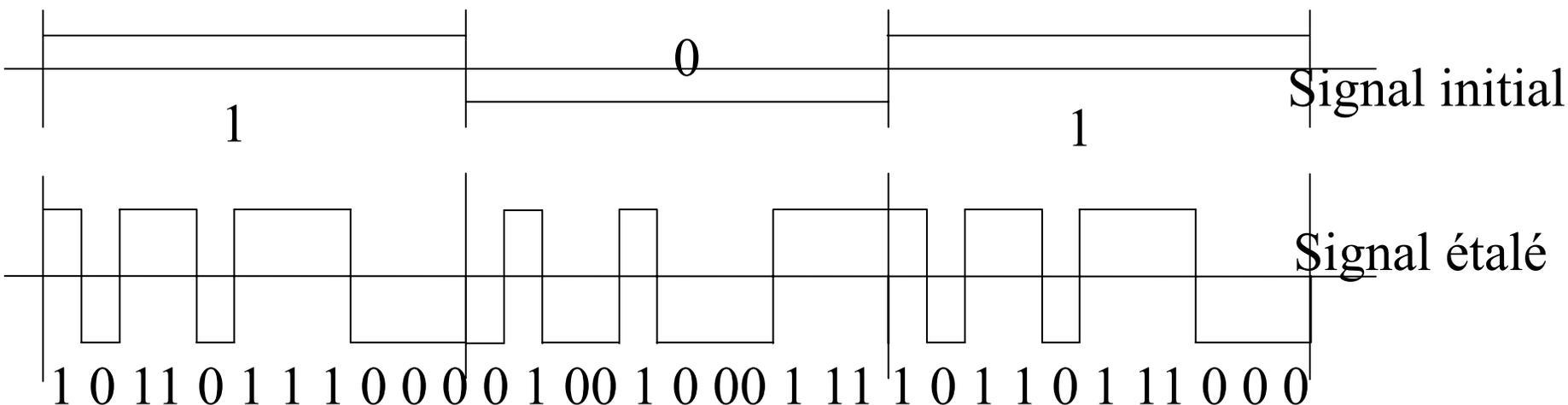
■ **DBPSK** : Differential Binary Phase Shift Keying **DQPSK** : Differential Quadrature Phase Shift Keying **QPSK** Quadrature Phase Shift Keying

■ **CCK** : Complementary Code Keying (Optionnel **PBCC** Packet Binary Convolutional Coding)

Niveau physique 802.11b: Code DSSS

Direct Sequence Spread Spectrum

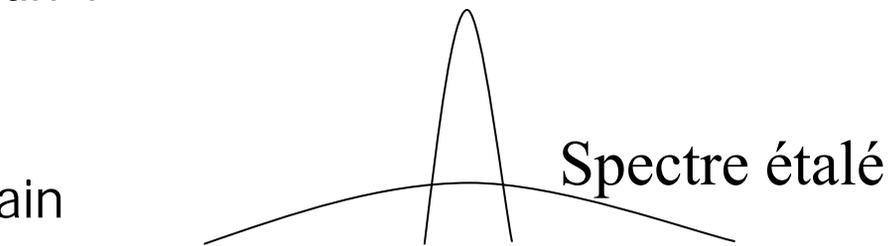
Etalement de spectre à séquence directe



- **Choix d'une séquence** de 11 bits (séquence 'Barker') pour représenter un 1 (10110111000). Son complément représente un 0 (01001000111).

- **Introduction de redondances** permettant la correction d'erreurs / gain de 10 décibel.

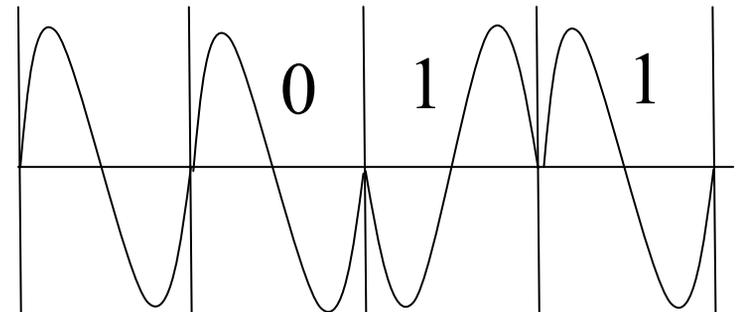
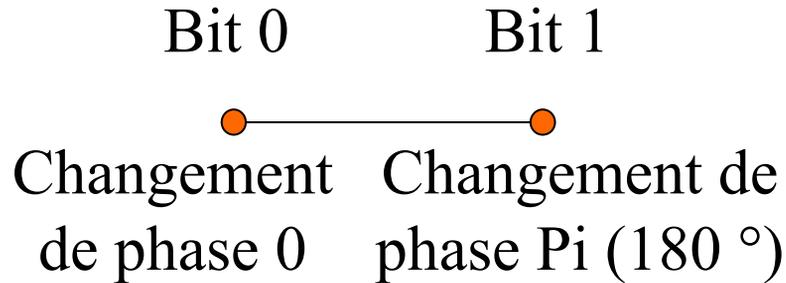
Spectre initial



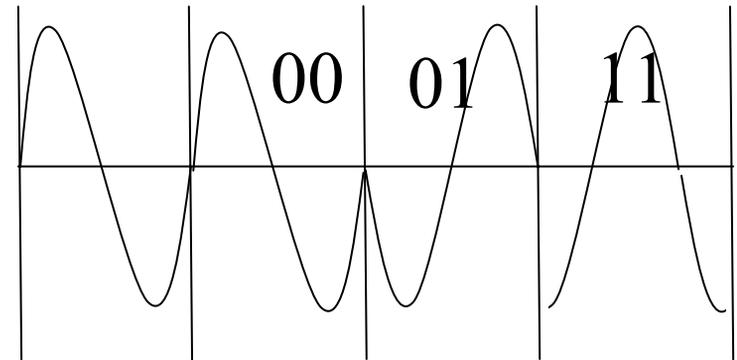
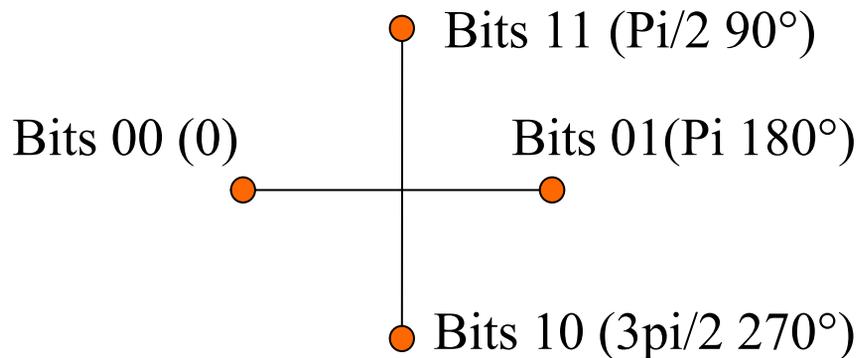
Niveau physique 802.11 b :

Modulations utilisées en 802.11 b

■ Débit 1 Mb/s : Modulation de phase différentielle binaire (un bit par intervalle) ('DBPSK Differential Binary Phase Shift Keying').



■ Débit 2 Mb/s : Modulation de phase différentielle de porteuses en quadrature (deux bits par intervalle). **DQPSK** Differential Quadrature Phase Shift Keying.

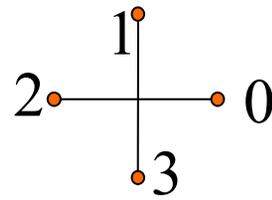


Niveau physique 802.11b : Code CCK 'Complementary Code Keying'

- **Exemple du code CCK 11 Mb/s** : on génère des symboles de 8 signaux DPSK (mot de code de 8 signaux pouvant avoir quatre phases différentes).
- **Première étape** : 8 bits ($d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8$) à transmettre génèrent 4 valeurs de phase $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ égales aux valeurs des dibits, (d_1, d_2) (d_3, d_4) (d_5, d_6) (d_7, d_8). (les phases Φ_i sont codées 0, 1, 2, 3).
- **Seconde étape** : les quatre phases $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ génèrent les 8 phases ($\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_8$) codées 0, 1, 2, 3 des huit signaux QPSK d'un symbole transmis (comme dans un code linéaire).

$$\Psi = (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_8) = (\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4) \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} + (00020020)$$

$$c = (e^{j\Psi_1\pi/2}, e^{j\Psi_2\pi/2}, e^{j\Psi_3\pi/2}, e^{j\Psi_4\pi/2}, e^{j\Psi_5\pi/2}, e^{j\Psi_6\pi/2}, e^{j\Psi_7\pi/2}, e^{j\Psi_8\pi/2})$$



Réseaux locaux partagés wifi : Niveau Physique



Le niveau physique wifi
selon la norme 802.11g

Niveau physique 802.11g :

Principales caractéristiques

1) Héritage 802.11a (2001) :

- Utilisation de la solution OFDM ('Orthogonal Frequency Division Multiplexing') avec les mêmes modulations (DBPSK, QPSK et QAM).
- Débits repris en 802.11g **DSSS-OFDM**: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mb/s

2) Compatibilité 802.11b (1999) :

- Utilisation de la bande ISM 2,4 à 2,4835 Ghz.
- Utilisation des standards **802.11b ERP-DSSS**: 1, 2 **ERP-CCK**: 5.5, 11 Mb/s (ERP Layers 'Extended Rate Physical layers' ensembles de codages/modulations).

3) Codage/modulation optionnels: CCK/OFDM PBCC/DPSK

ERP-OFDM: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 et **ERP-PBCC**: 5.5, 11, 22, 33Mb/s

4) 802.11g (2003): Adaptation du débit aux conditions de transmission

5) 802.11g: distances de 40m à 140 m pour des débits de 6 à 54 Mb/s

Niveau physique 802.11g : OFDM

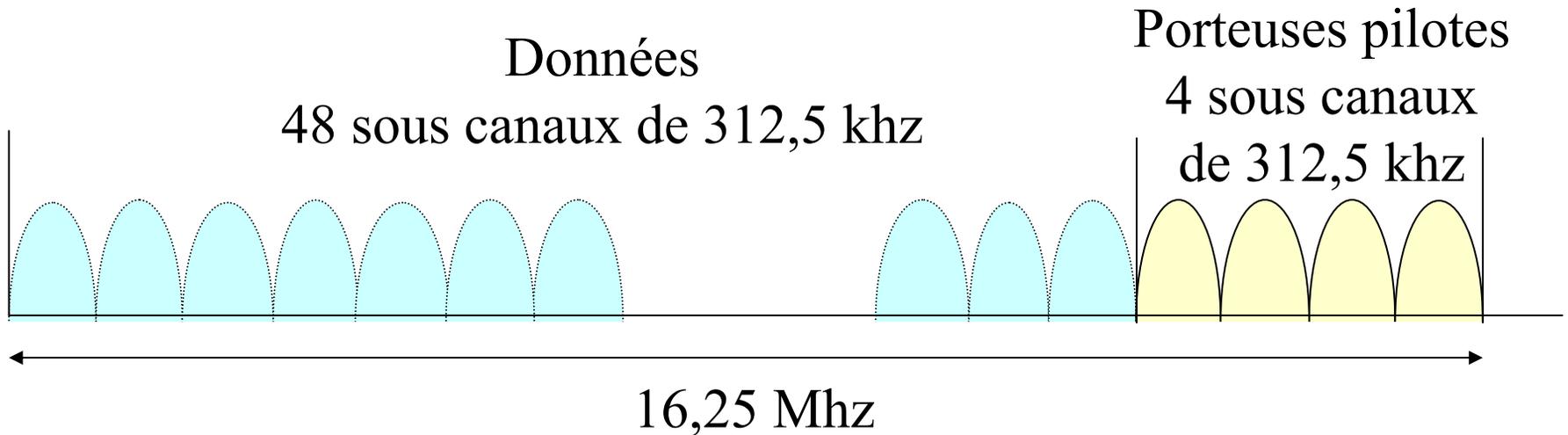
Orthogonal Frequency Division Multiplexing

- 1) Technique majeure dans les transmissions numériques (années 1960)
- 2) **Applications multiples:** Radio numérique (DAB Digital Audio Broadcasting), Télévision numérique hertzienne DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial, Accès aux réseaux numériques par le téléphone filaire ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line).
- 3) **FDM Multiplexage fréquentiel : utilisation d'un découpage en sous canaux => OFDM = modulation à porteuses multiples**
 - Modulation dans chaque sous canal minimisant les interférences entre canaux.
 - Solution au problème des trajets multiples dus aux réflexions: canaux étroits et intervalles de garde (91 ns avec écho 500ns ou 3200 ns + garde de 800 ns).
- 4) **O Orthogonalité: Espacer très régulièrement les canaux**
 - Les porteuses forment un ensemble orthogonal qu'il est facile de séparer

$$\psi_k(t) = e^{jk\omega t}; \int_T \psi_k(t) \psi_l^*(t) dt = 0 \text{ si } k \neq l; = T \text{ si } k = l$$

- 5) **Utilisation de circuits spécialisés de transformée de Fourier** (pour la modulation dans les sous canaux).
- 6) **C pour Codage** (COFDM): Entrelacement des bits, Réserve de sous canaux pour transmettre des informations de redondances => correction d'erreurs.

WIFI 802.11g : Le découpage d'un canal OFDM



- **Canaux de données (et de redondances): 48**
- **Données codées à l'émission** au moyen d'un code correcteur d'erreurs. Selon les débits $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ des canaux sont utilisés pour la redondance de données.
- **Sous canaux servant à la transmission de porteuses 'pilotes': 4**
 - | On y émet des séquences de données fixes.
 - | Utilisées pour évaluer les délais de propagation et les interférences de symboles.

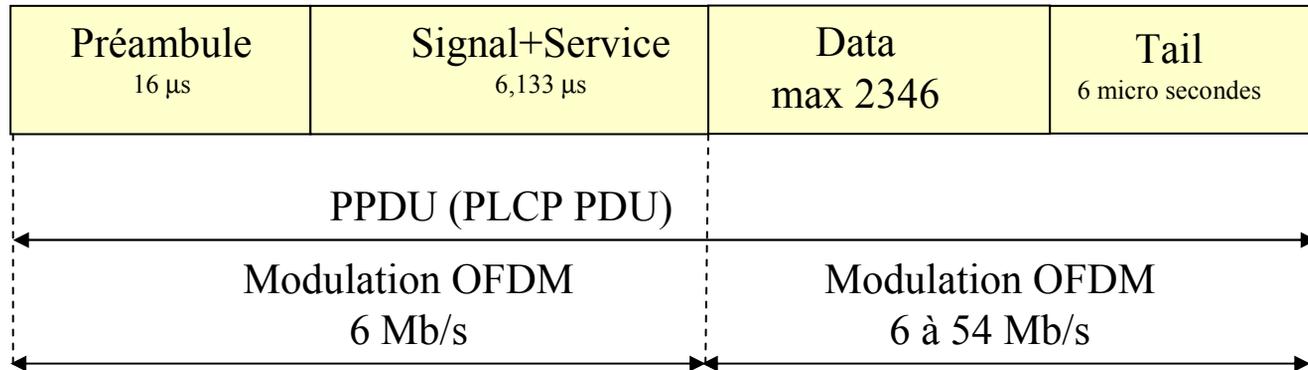
Niveau physique 802.11g :

Codages et modulations en OFDM

Débit binaire	Débit par sous canal	Bits codés par symb	Débit en M symboles /s	Code (FEC)	Modulation
6 Mb/s	0,125 Mb/s	1 bit	12 Ms/s	24/48	BPSK
9 Mb/s	0,1875 Mb/s	1 bit	12 Ms/s	36/48	BPSK
12 Mb/s	0,25 Mb/s	2 bits	24 Ms/s	48/96	QPSK
18 Mb/s	0,375 Mb/s	2 bits	24 Ms/s	72/96	QPSK
24 Mb/s	0,5 Mb/s	4 bits	48 Ms/s	96/192	16-QAM
36 Mb/s	0,75 Mb/s	4 bits	48 Ms/s	144/192	16-QAM
48 Mb/s	1 Mb/s	6 bits	72 Ms/s	192/288	64-QAM
54 Mb/s	1,125 Mb/s	6 bits	72 Ms/s	216/288	64-QAM

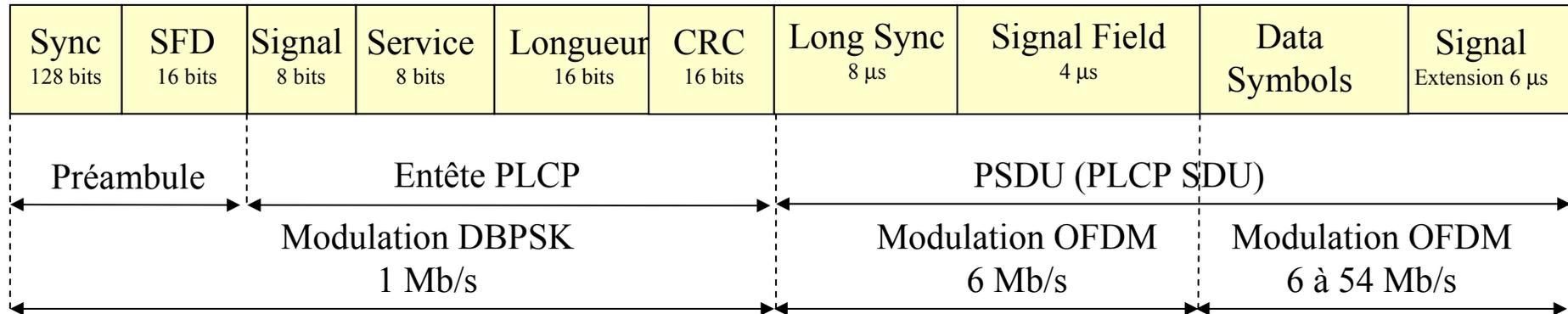
FEC : Forward Error Correction **QAM** : Quadrature Amplitude Modulation

WIFI 802.11g : Le format de trame DSSS-OFDM (pur 802.11g)



- **PPDU (PLCP PDU)**: Une unité de protocole de niveau physique.
- **L'entête PLCP** est transmise à 6 Mb/s.
- **Préambule**: Synchronisation pour une transmission OFDM.
- **Zone signal** (24 bits): le débit de transmission utilisé pour la zone données et sa longueur (un symbole de 4 µs à 6 Mb/s). La zone service est de 2/3 de symbole soient 16 bits (inutilisée).
- **La zone de données** contient une trame de niveau MAC d'une longueur maximum de 2346 octets.
- A la fin **TAIL** est une zone de silence de 6 micro secondes.

WIFI 802.11g : Le format mixte d'une trame compatible 802.11b



- **PSDU (PLCP SDU)**: la charge utile d'une trame au niveau physique après le préambule et la zone PLCP comme en 802.11b à 1 Mb/s (la partie signal de la zone PLCP code par un débit à 3 Mb/s tous les débits OFDM).

- Les deux premières zones sont toujours émises à 6 Mb/s:

- **Long Sync (Long Training Sequence)** est une séquence de synchronisation de deux fois 4 micro seconde plus un intervalle de garde.

- **OFDM Signal** définit le débit et la longueur pour la partie OFDM Data Symbols.

- **Data symbols**: la partie MAC habituelle suivie de 6 μ s de silence (signal extension).

Liste des autres standards 802.11



- **802.11c** : Protocole de réalisation des ponts 802.11
- **802.11d** : Harmonisation internationale des réseaux 802.11.
- **802.11e** : Qualité de service en wifi (transmission de la voix et de la vidéo).
- **802.11f** : Itinérance entre AP ('roaming').
- **802.11h** : Gestion de la bande 5 Ghz en Europe réglementation fréquences, relation avec HiperLAN2 .
- **802.11i** : Amélioration de la sécurité.
- **802.11j** : Adaptation à la réglementation japonaise.

WIFI : Conclusion

■ Avantages

- **Supprime les câblages** (construction ' ad-hoc ').
- **Débit acceptable** pour un grand nombre d'applications.

■ Inconvénients

- **Surcharges** protocolaires (11 Mb/s => 6,38 Mb/s réels).
- **Problèmes des transmissions** hertziennes.
 - Distances assez faibles, Interférences
- **Problèmes de sécurité**
- Mise en œuvre de **l'itinérance entre cellules** (Roaming)
- **Qualité de service** (téléphone sur wifi).

Bibliographie Wifi

- Documents web
- Normes relatives au Wifi. <http://www.ieee.org/>
- Davor Males, Guy Pujolle 'Wifi par la pratique' , Eyrolles, 2002
- Mustafa Ergen, 'IEEE 802.11 Tutorial', Université de Californie à Berkeley, Juin 2002

Réseaux locaux



Réseaux locaux commutés "Lan Switching"

- 1 Notions générales.
- 2 Techniques de commutation.
- 3 Techniques de routage.
- 4 Réseaux locaux virtuels.

Commutation de réseaux locaux



1

Notions générales

Besoin de réseaux locaux commutés

Nombreuses limitations du mode Ethernet partagé (Ethernet unidirectionnel ' Half duplex ')

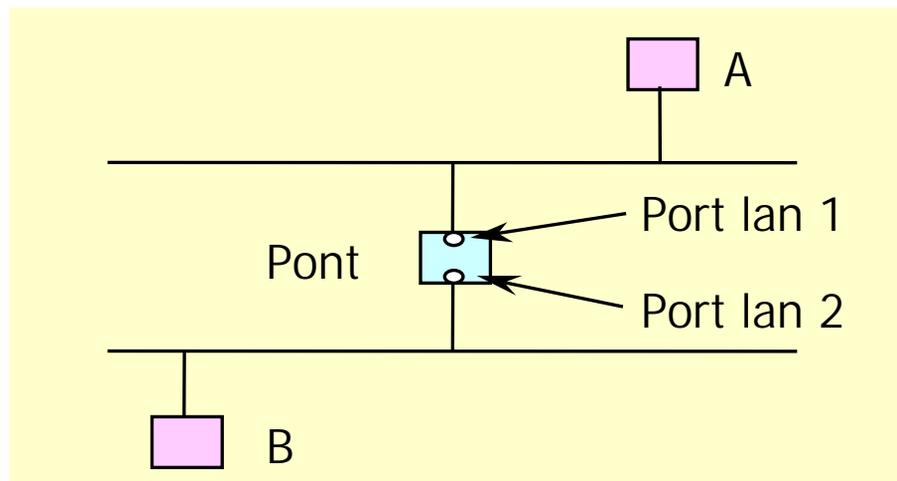
- **Performances en débit** : Pour des grands réseaux (milliers de stations) et de gros volumes de données (accès fichier, multimédia).
- **Difficultés d'extension en distance**: problème des collisions.
- **Sécurité** : tout message est accessible par toutes les stations.
- **Problème essentiel du mode partagé**: mode diffusion générale de tous les messages (mode ' promiscuous '), tous les tronçons sont reliés par des répéteurs donc toutes les stations voient passer toutes les trames point à point, toutes les diffusions, toutes les collisions, toutes les erreurs ...

La dégradation des performances et de la sécurité a conduit progressivement à une inadaptation de l'architecture partagée.

Évolution historique (1) : répéteurs, ponts

Dispositifs pour améliorer les réseaux Ethernet

- **Répéteur ou ' hub '** (pour mémoire) : **recopie de niveau physique**, bit à bit des informations de tronçon à tronçon (propre au mode partagé).
- **Pont (' bridge ')** : historiquement **un matériel de connexion entre deux réseaux locaux** agissant en recopiant toutes les trames d'un tronçon sur l'autre (agit au niveau trame par exemple en stockage et retransmission)
=> **Ne propage pas les erreurs ou les collisions** : limitation des domaines de collision à chaque réseau local).

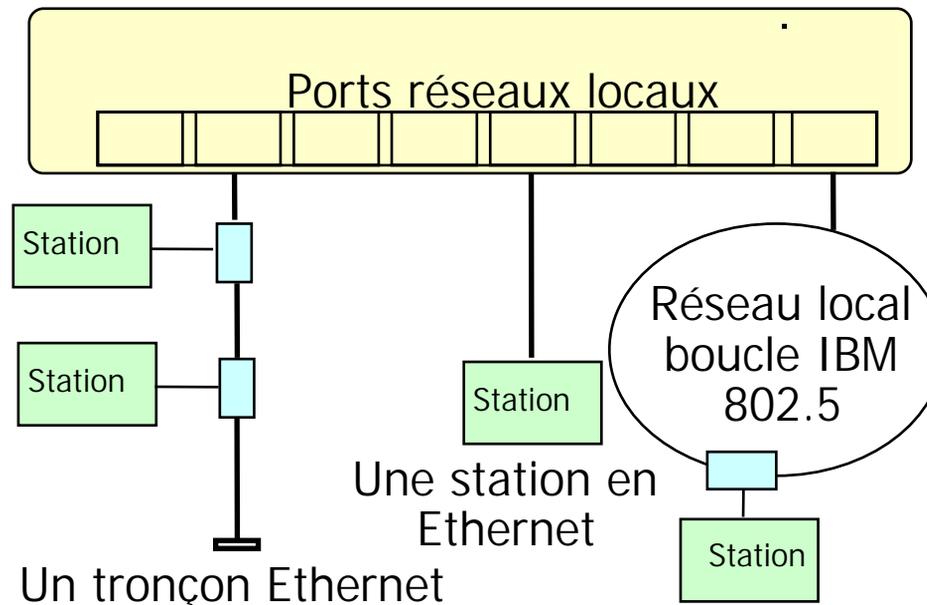


Évolution historique (2) : ponts filtrants, commutateurs

- **Ponts filtrants ('filtering bridges')** : Historiquement la première version de la commutation des réseaux locaux: un pont filtrant agit entre deux tronçons et ne laisse passer que le trafic devant transiter d'un tronçon à l'autre ('forwarding')

=> **Les diffusions s'étendent encore à tous les tronçons.**

- **Commutateur de réseau local ('lan switch')** : Un dispositif capable de commuter un grand nombre de tronçons de réseaux locaux (8, 16 , 32...) de standards éventuellement différents.



Commutateur de réseaux locaux : architecture en couches, routage

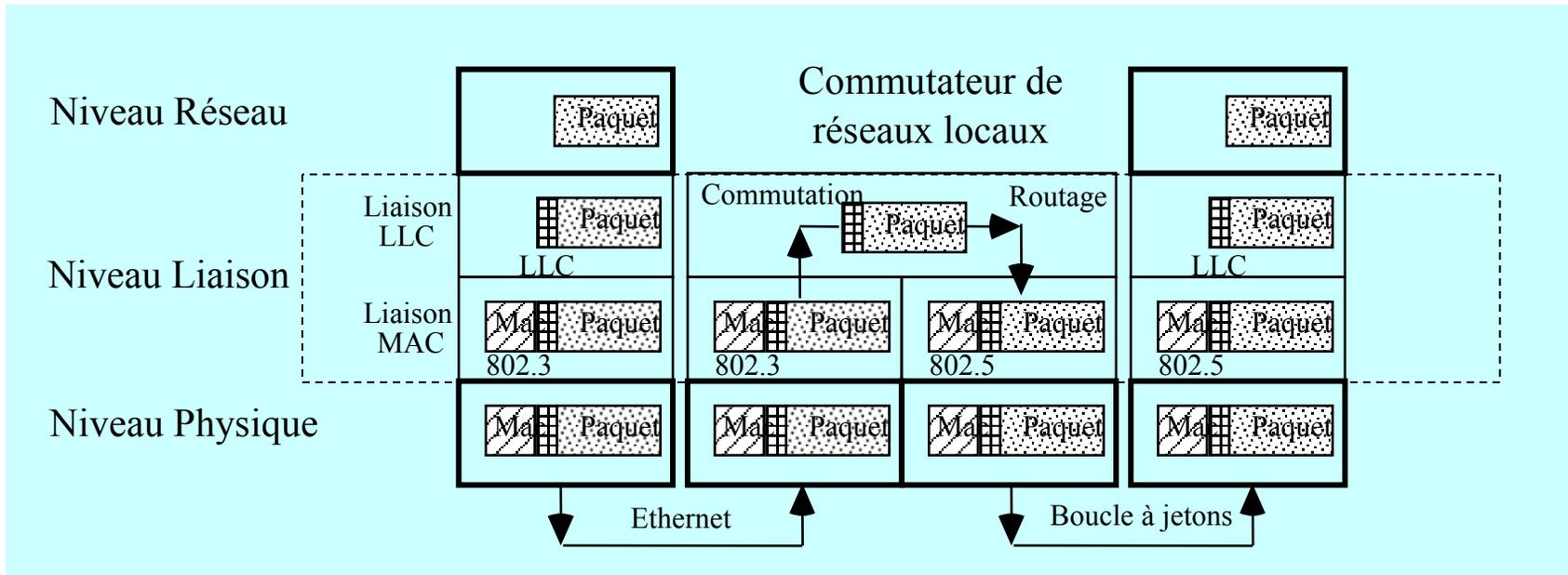


Table de routage

Adresse	Port	Date
42:AB:E3:10:98:33	3	19:27
5C:72:C2:C3:51:01	5	19:29

Commutateurs de réseaux locaux: Le fonctionnement ' transparent '

■ **Transparence ('Transparent Bridges/Switches')**

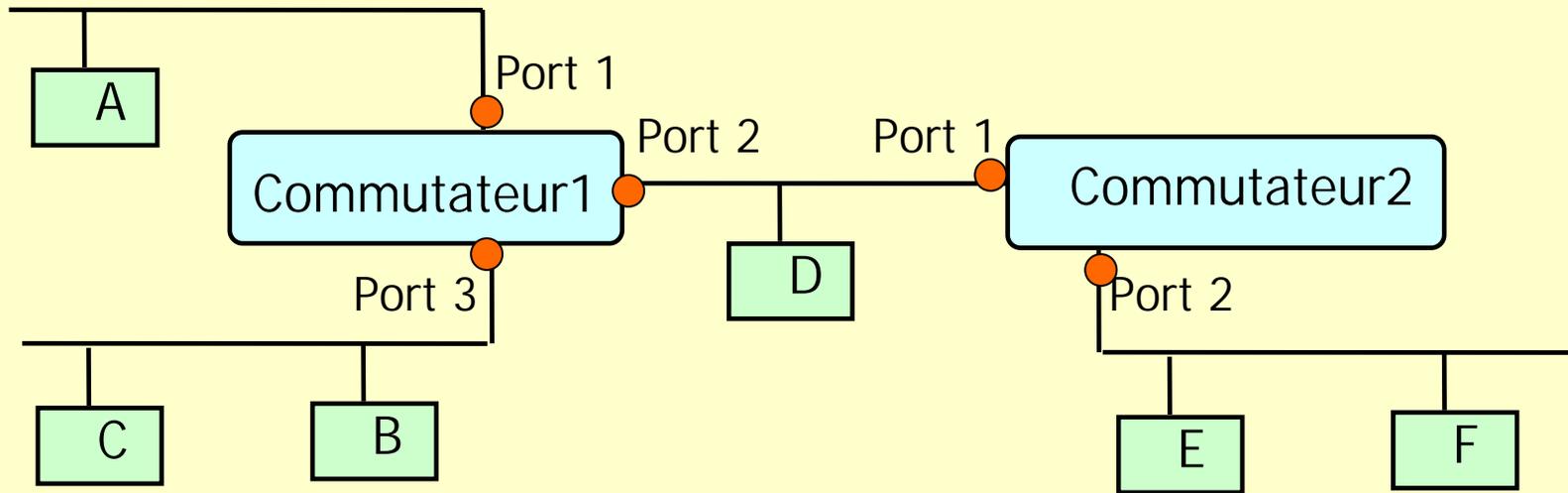
On branche physiquement une configuration de commutateurs et de stations quelconque et l'ensemble doit s'autoconfigurer sans aucune intervention humaine (fonctionnement ' plug and play ').

■ **Apprentissage 'a posteriori' ('Backward Learning '):**

A chaque arrivée de trame sur un port, les commutateurs notent dans la table de routage l'adresse d'émission avec son port.

- A l'initialisation **les tables de routage sont vides.**
- Toutes les trames circulant sur les tronçons reliés à un commutateur sont **écoutées.**
- Les **adresses sources et les ports** sont notés dans la table.
- Si la destination d'une trame à relayer n'est pas connue, la trame est diffusée **sur tous les ports pour atteindre son destinataire.**
- Si une destination est connue la trame est **recopiée sur le seul port** de l'adresse destination sauf si c'est le même port que celui de la source.

Commutateurs de réseaux locaux: Exemple de l'apprentissage



- Trame C vers D : le commutateur 1 diffuse sur les ports 1, 2 et apprend que la station C est du côté du port 3. La trame est délivrée à D.
- Trame B vers C : le commutateur 1 ne retransmet pas la trame et apprend que la station B est du côté du port 3. La trame est délivrée à C.
- Trame F vers A : les commutateurs 1 et 2 reçoivent et diffusent. Le commutateur 2 apprend que F est du côté du port 2 et le commutateur 1 que F est du côté du port 2. La trame est délivrée à A.

Commutateurs de réseaux locaux: un peu de terminologie

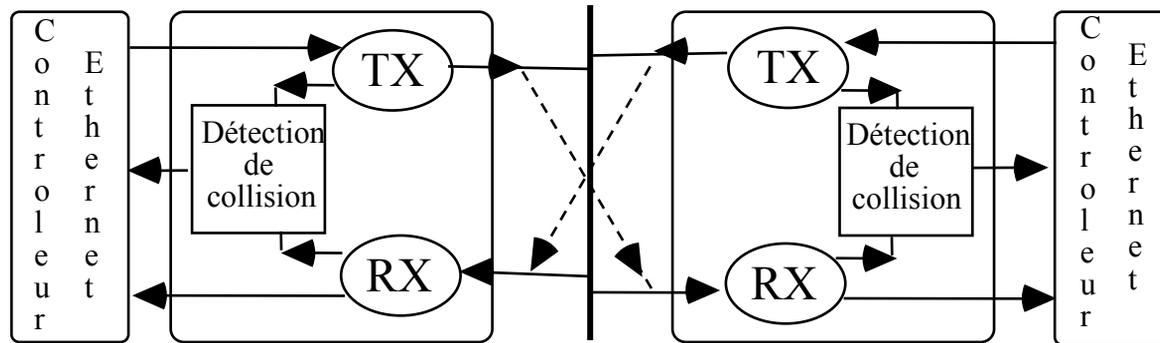
Selon le point de vue par lequel on considère le dispositif ou selon ses fonctions.

- Commutateur de réseaux locaux "**Lan switch**"
- Pont (par analogie des fonctions) "**Bridge**"
- Commutateur de niveau 2 "**Layer 2 switch**"
- Commutateur multi-niveaux (2 niveaux supportés, LAN et IP ou LAN et ATM) "**Multi layer switch**"
- Proxy LAN emulation client" **Proxy LEC** " ou Dispositif de périphérie (d'un réseau ATM) "**Edge device** "

Mode Ethernet Bidirectionnel (1)

(' Full Duplex ')

■ **Rappel Mode Ethernet partagé** : protocole à l'alternat "half duplex" soit on émet soit on reçoit. En 10 BAS T connexion avec deux paires. Paire émission TX + paire réception RX. RX sert en écoute de collision si TX émet) sinon RX reçoit seule.



■ Avec l'utilisation d'un commutateur Ethernet et avec une seule station par port : pas de collisions
=> Possibilité de **suppression de la gestion des collisions.**

Mode Ethernet Bidirectionnel (2)

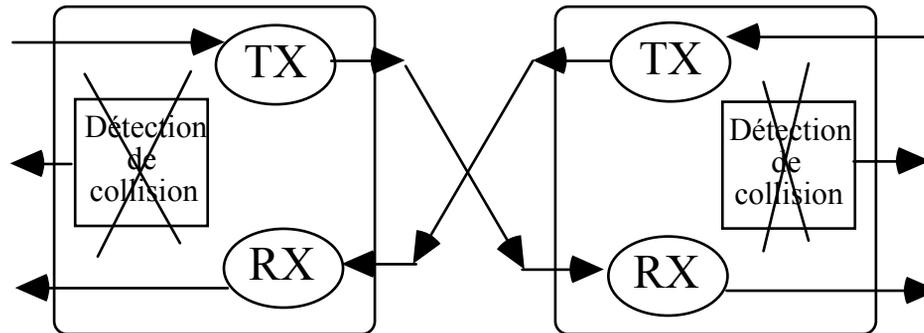
(' Full Duplex ')

■ Modification de l'interface ethernet pour utiliser les deux paires simultanément en transmission

■ On connecte **directement** TX sur RX en mode bidirectionnel.

■ Reste le **format** des trames et les techniques de communication **physique**.

■ Notion de carte et de port **Ethernet "full duplex"** avec débit double de 2 fois 10 Mb/s ou 100 Mb/s ou 1 Gb/s (10 Mb/s émission 10 Mb/s réception).



Commutation de réseaux locaux

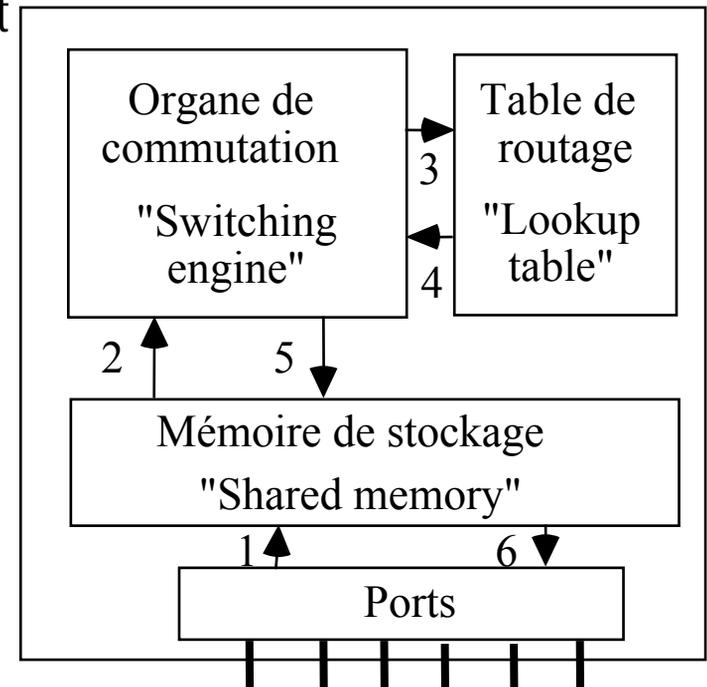


2

Techniques de commutation

Commutation en mémoire partagée (en stockage et retransmission)

- Terminologie anglaise: ' shared memory '
- ' store and forward '
- La trame entrante est **entièrement reçue** et **stockée dans la mémoire**.
- 2 Le module de commutation **extraie l'adresse de destination**.
- 3 L'adresse est **envoyée à la table de routage**.
- 4 Le **résultat** de la recherche est **retourné**.
- 5 L'adresse du port sortie est **propagée**
- 6 La trame est renvoyée à partir de la mémoire **sur le port de sortie approprié**.
- **Problème:** le retard de commutation.



Commutation à la volée

- Terminologie anglaise: 'Cut through', 'On the fly', 'fragment free', 'fast forward'.

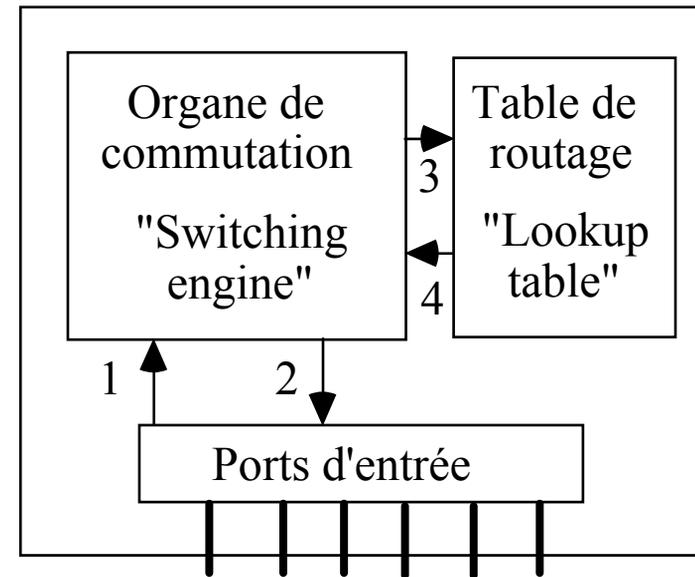
- 1 L'organe de commutation **lit le début de trame et** extrait **l'adresse destination**. La trame **continue d'arriver**.

- 2 L'adresse est **envoyée à la table de routage**.

- 3 Le résultat de la recherche est **retourné**.

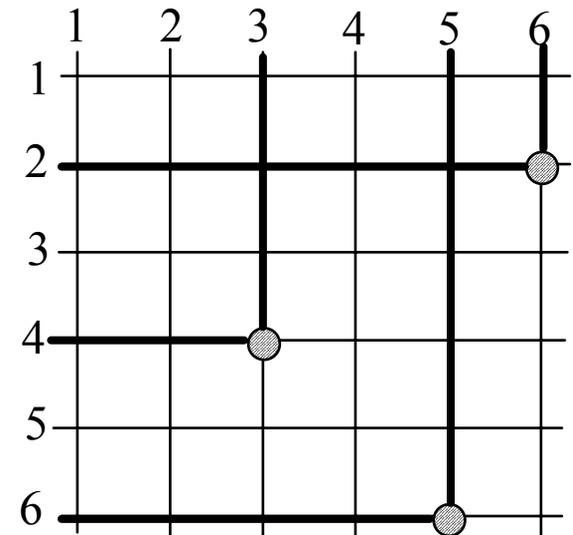
- 4 Le module de commutation **renvoie la trame sur le port de sortie dès que possible** (de préférence avant qu'elle ne soit entrée totalement).

- **Problèmes** : tests de correction de la trame et conflits d'accès aux ports de sortie.



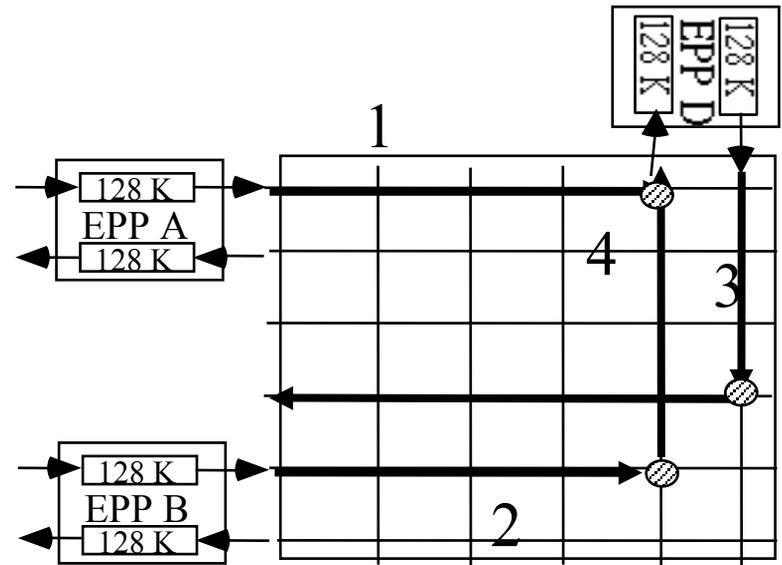
Techniques pour la commutation à la volée : commutation spatiale

- Rappel commutation spatiale (' cross bar ', ' matrix ')
- Pour N ports de communication (N petit), utilisation d'une matrice NxN de points de connexions (Matrice "Cross point")
- Utilisation d'aiguillages bâtis autour de circuits intégrés assemblés en matrice.
- Retard de commutation très faible et commutation en parallèle possible.



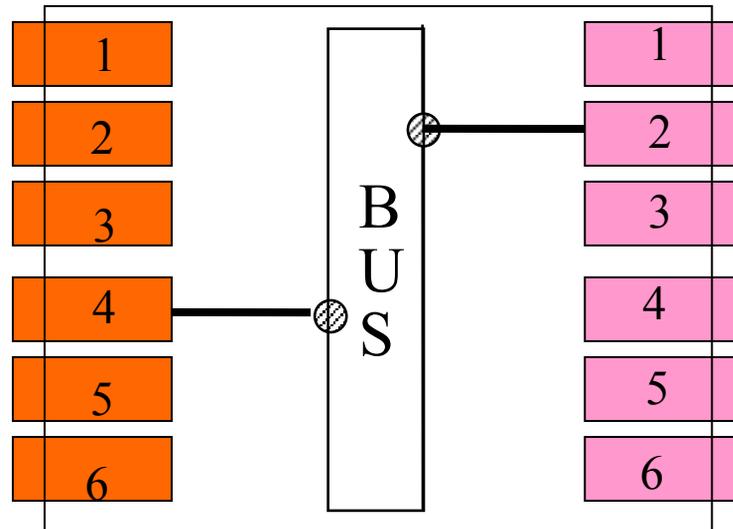
Commutation spatiale: Gestion des conflits d'accès par files d'attente.

- Exemple : Kalpana EPS 1500 2-15 ports 10BAS2, 10BAST, 10BASFL, AUI, 1700 adresses par port, 6000 adresses par commutateur.
- "EPP Ethernet Packet Processor"
Processeur de ports d'entrée/sortie avec gestion de tampon (256 trames 1518 octets)
 - (1) Port A: trame à destination de D
 - Port D occupé en sortie par B (2)
 - EPP A stocke sa trame en entrée
 - (1) Port A: trame à destination de D
 - Autre cas (3): le Port D est occupé en entrée (Ethernet half duplex impossible de sortir)
 - Le port D stocke une trame commutée dans ses tampons de sortie (4).



Architecture de commutateurs à bus

- Pour N ports de communication, utilisation d'un **bus haut débit** qui assure la **fonction de commutation**.
- Nécessité de **tampons pour traiter les conflits d'accès**.



- Gestion des **adresses et des files d'attente** au niveau des cartes de gestion de port.

Techniques pour la commutation à la volée: commutateurs de cellules à bus

Architecture de commutateur type ATM

- Utilisation d'une **architecture** existante à commutation de cellule (en anglais ' **cell backplane switch** ').
- Découpage d'une trame en **cellules courtes de taille fixe** (cellule ATM 53 octets dont 48 de charge utile).
- Chaque cellule est étiquetée avec un **entête qui définit le port de sortie**.
- Les cellules sont commutées puis **stockées dans les tampons du port de destination**.
- La trame est **réassemblée** à partir de ses cellules **et transmise**.

Comparaison des deux types d'architectures

■ En stockage et retransmission

- On examine **la trame en entier**.
- On peut **détecter tous les cas de trames erronées**.
- **Seules** les trames **correctes sont relayées**.
- Le temps de commutation est plus **important**.

■ En commutation à la volée

- Seuls les **premiers octets sont stockés**.
- La trame est passée au destinataire **sans examiner la fin**.
- Certaines trames en **erreur peuvent être relayées**.
- Le **retard de commutation** d'une trame est **plus faible**.

Commutation de réseaux locaux



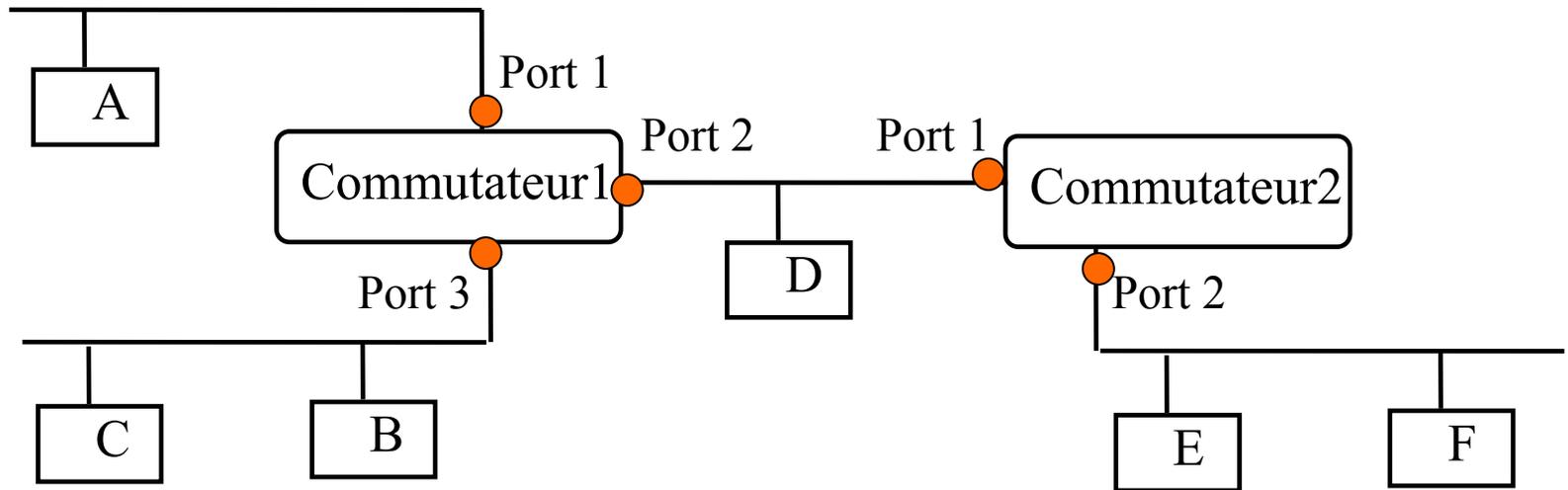
3

Techniques de routage

Position du problème de routage

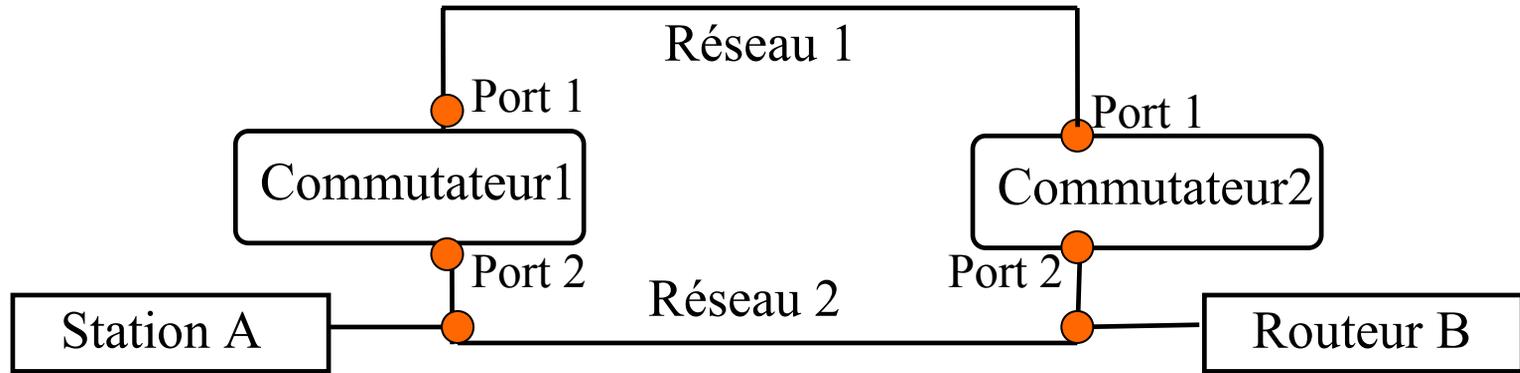
- En présence d'un ensemble de commutateurs de réseaux locaux interconnectés: **comment trouver le chemin qui permet d'aller d'un point à un autre.**

- Construction pour chaque commutateur **d'une table de routage (' forwarding data base ')**



- Rappel: volonté **d'auto configuration automatique** du routage au moyen de techniques d'apprentissage

Problème de l'existence de deux ponts en parallèle: la tempête de diffusions

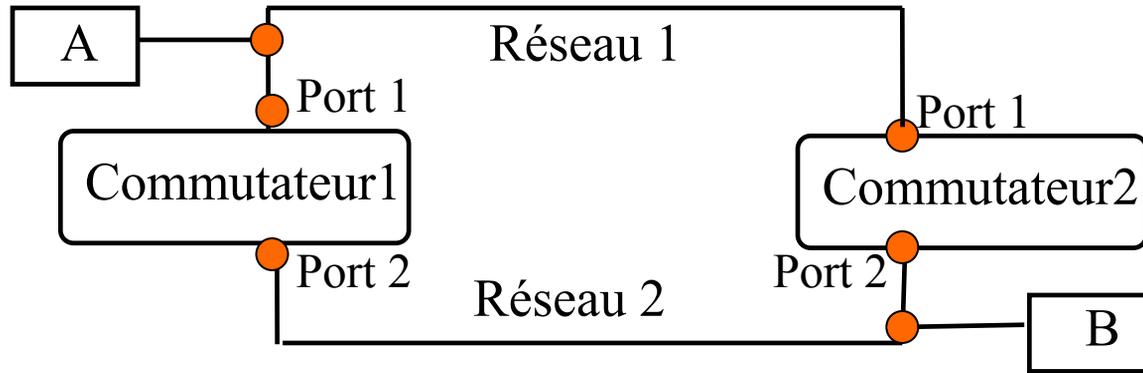


- Trame en diffusion générale adresse FF:FF:FF:FF:FF (par exemple protocole ARP, B routeur veut apprendre l'adresse de A) : A reçoit mais les deux commutateurs 1 et 2 reçoivent aussi par leur port 2 cette diffusion et selon la règle **répercutent** la trame sur le réseau 1 par leur port 1.

- Le commutateur 1 reçoit alors une diffusion du commutateur 2 sur son port 1 et doit donc **replacer** cette trame sur le réseau 2 par son port 2 (il en est de même pour le commutateur 2).

- Les trames en diffusion vont donc circuler indéfiniment entre les commutateurs (notion de tempête de diffusion ' broadcast storm ')

Problème de l'existence de deux ponts en parallèle: l'instabilité des tables



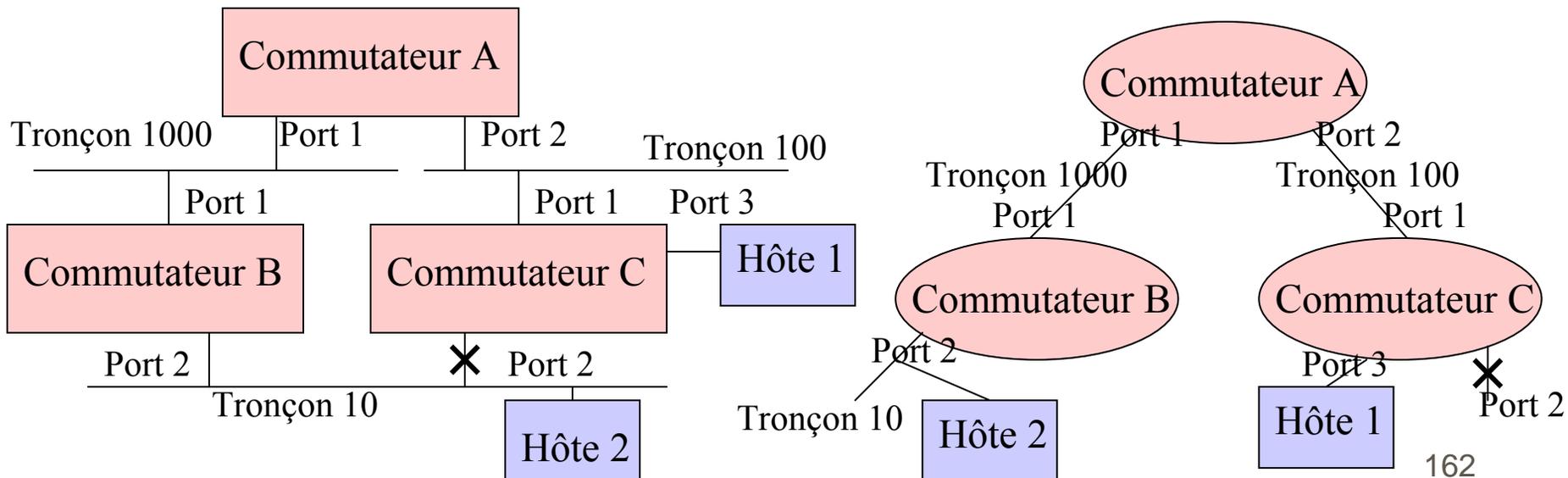
- Trame de A vers B: le commutateur 1 apprend que **la station A est accessible par son port 1**.
- Mais les deux commutateurs 1 et 2 reçoivent par leur port 1 et **répercutent** la trame sur le réseau 2 par leur port 2. B reçoit.
- Le commutateur 1 reçoit une seconde fois la trame sur son port 2 et donc **considère que la station A est accessible par son port 2 ce qui est faux**. Le commutateur 2 fait la même erreur.
- Les communications s'enchaînent et les tables de routage **oscillent en permanence**.

Le routage par arbre couvrant : principes généraux (1)

- La norme 802.1 D définit le protocole de routage par arbre couvrant : **STP** ' Spanning tree protocol '.
- La solution la plus immédiate au problème des circuits : **n'avoir qu'un seul chemin** pour aller d'un point à un autre au moyen de commutateurs de réseaux locaux.
- Soit le graphe dont les sommets sont les commutateurs et les arcs sont les tronçons de réseaux locaux: pour n'avoir qu'un seul chemin d'un point à un autre du graphe on utilise un **arbre couvrant**.
- L'**arbre couvrant est construit automatiquement** par dialogue entre les commutateurs: utilisation de trames Hello et BPDU ' Bridge Protocol Data Units ' (Radia Perlman 1992).

Le routage par arbre couvrant : principes généraux (2)

- Principe de routage: en fonctionnement normal, pour aller d'un point à un autre on utilise l'arbre. **On va d'un commutateur à la racine puis de la racine à un autre commutateur** ce qui définit un chemin unique.
- Certains chemins sont **abandonnés**. Ils ne peuvent servir que sur panne et reconfiguration du réseau avec un autre arbre.



Étapes de construction de l'arbre couvrant : Étape 1

■ Élection du commutateur racine de l'arbre

Le commutateur de plus faible priorité puis de plus faible adresse mac est élu par échange de messages.

Priorité : 0 à 32768 définie par configuration

Identifiant unique: adresse MAC unique de l'un des ports.

En réunissant les deux notions: **Identificateur de pont** (BID ' Bridge ID '): priorité (2 octets), adresse MAC (6 octets)

Exemple: priorité 32768 (8000 en hexadécimal), adresse MAC 00:A0:D6:13:43:65, identificateur du commutateur pour les comparaisons 8000:00A0:D613:4365.

Étapes de construction de l'arbre couvrant : Étape 2

Élection du port racine de chaque commutateur

- Pour chaque commutateur on doit déterminer **un port unique** qui le connecte à la racine: le port racine (' root port ').
- On détermine tous les **chemins** du commutateur vers la racine
- Pour chaque chemin on calcule **le coût** du chemin à partir d'un coût attribué à chaque lien (chaque tronçon de réseau local).
- On choisit **le port racine** comme celui de **plus court chemin** et en cas d'égalité de plus faible priorité (selon une priorité définie par configuration).

Étapes de construction de l'arbre couvrant : Étape 3

■ Élection du port désigné

- Un **tronçon** est possiblement **connecté à la racine** par **plusieurs commutateurs** (plusieurs ports de commutateurs).
- On doit déterminer l'un de ces ports de commutateur comme **port ' désigné '**. C'est un port unique qui permettra au tronçon de communiquer avec la racine.
- On sélectionne comme **port désigné celui de chemin le plus court jusqu'à la racine** (puis celui dont l'adresse MAC est la plus petite).
- Les autres ports sont **bloqués**.

Approfondissements : coûts des différents types de réseaux locaux

Débit	Coût Recommandé	Intervalle de coût recommandé
4Mbps	250	100 à 1000
10Mbps	100	50 à 600
16Mbps	62	40 à 400
100Mbps	19	10 à 60
1Gbps	4	3 à 10
10Gbps	2	1 à 5

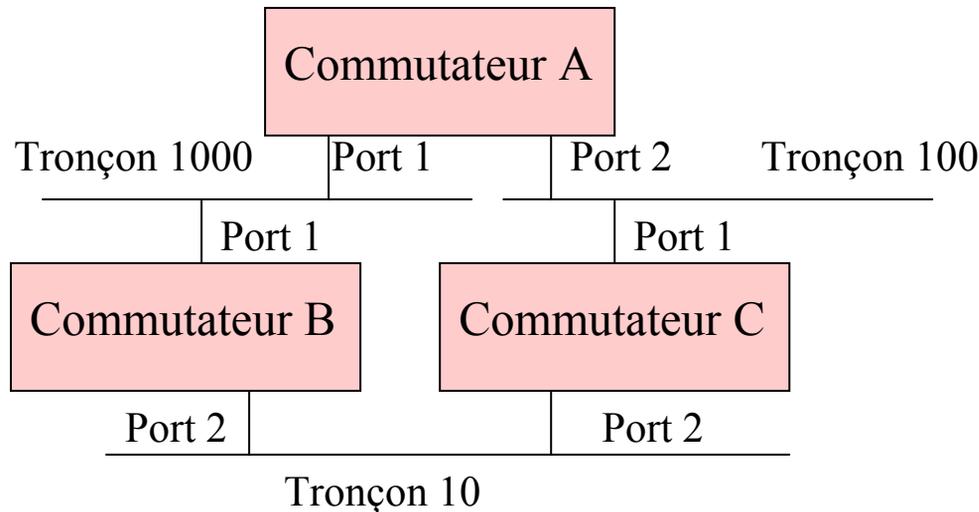
Approfondissements : états d'un port

■ Les ports participants à l'algorithme de l'arbre couvrant peuvent être dans cinq états:

- **Listening - Écoute** : émet/reçoit des BPDU pour la construction de l'arbre mais ne relaye pas les trames.
- **Learning - Apprentissage** : apprend l'existence d'adresses MAC mais ne relaye pas les trames.
- **Blocking - Bloqué** : en écoute uniquement des trames de type BPDU, ne relaye pas les trames normales.
- **Forwarding - Relais** : port qui émet et reçoit des trames de la racine.
- **Disabled - Déconnecté** : port sans aucune activité.

Approfondissements : un exemple de fonctionnement

Étape 1

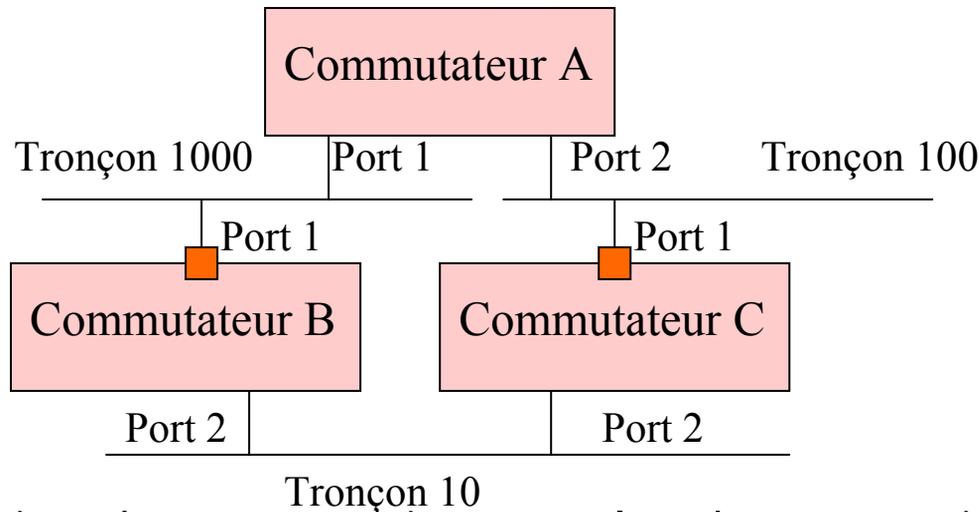


- Étape 1 : Élection du commutateur racine avec les données suivantes
Commutateur A : Priorité=10 , MAC=00B0D7000001, ID=000A00B0D7000001
Commutateur B : Priorité=27 , MAC=00B0D7000002, ID=001B00B0D7000002
Commutateur C : Priorité=32768 , MAC=00B0D7000003, ID=800000B0D7000002

- On élit le **commutateur A**.

Approfondissements : un exemple de fonctionnement

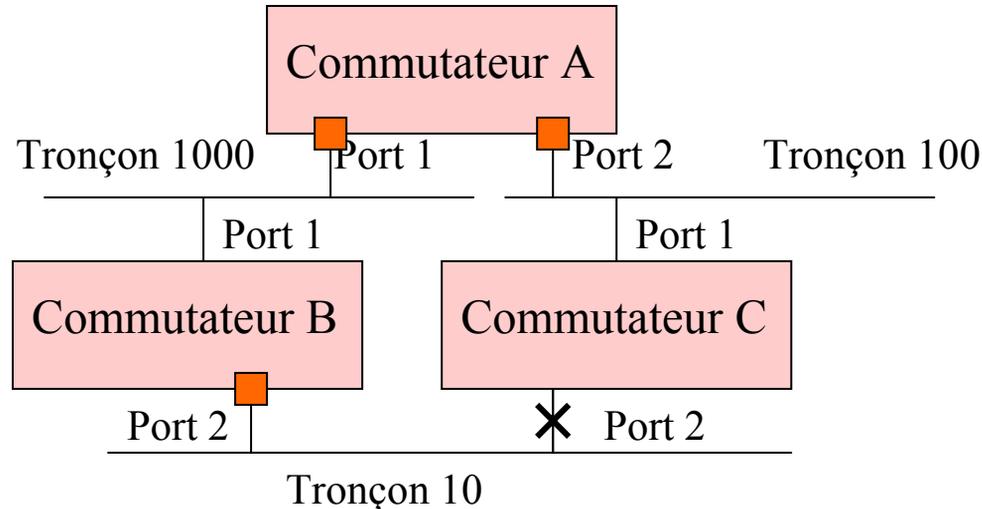
Étape 2



- Étape 2 : Élection des ports racine avec les données suivantes
Commutateur A : Port 1 Coût 4 Priorité 128, Port 2 Coût 19 Priorité 128
Commutateur B : Port 1 Coût 4 Priorité 128, Port 2 Coût 100 Priorité 128
Commutateur C : Port 1 Coût 19 Priorité 128, Port 2 Coût 100 Priorité 128
- **Commutateur B** Chemin de B à A: Par le port 1 coût 4, par le port 2 coût 119 donc port 1 moins cher port racine.
- **Commutateur C** Chemin de C à A: Par le port 1 coût 19, par le port 2 coût 104 donc port 1 moins cher port racine.

Approfondissements : un exemple de fonctionnement

Étape 3



- Étape 3 : Élection des ports désignés avec les données suivantes
Tronçon 1000 : Commutateur A Port 1 Port désigné commutateur A racine
Tronçon 100 : Commutateur A Port 2 Port désigné commutateur A racine
Tronçon 10 : Commutateur B Port 2 coût 4, et Commutateur C Port 2 coût 19. Le coût le plus faible gagne. Le port 2 commutateur B est désigné. Le port 2 commutateur C n'étant pas désigné est bloqué.

Conclusion : construction de l'arbre couvrant



- La principale conséquence de la méthode de routage par arbre couvrant est **qu'il ne sert à rien de créer des chemins redondants pour améliorer les performances** => on ne garde qu'un seul chemin actif les autres sont bloqués.
- Les seules **redondances de chemin utilisables** le sont **pour des objectifs de sûreté de fonctionnement**.

Annexe: ponts en routage par la source

"Source routing bridges"

- La solution par arbre couvrant **optimise mal les ressources** offertes par les différents commutateurs.
- Solution différente au problème de routage adoptée par IBM pour les boucle à jeton et utilisée **uniquement** dans ce cas
- Chaque station émettrice **doit connaître la topologie d'ensemble du réseau des commutateurs.**
- Pour chaque trame transmise l'émetteur place dans la trame **la liste des commutateurs à traverser.**
- On peut avoir plusieurs routes pour aller d'un point à un autre et **optimiser les communications.**
- => **Allongement des tailles maximum de trame possible** uniquement pour les communications entre commutateurs.^{1,72}

Commutation de réseaux locaux



4

Les réseaux locaux virtuels

Position du problème des réseaux locaux virtuels

- Création de "**sous réseaux locaux**" regroupant des stations sur une base logique et non topologique.

- Les groupes cohérents indépendamment de la localisation géographique des stations forment des **réseaux locaux virtuels** ou **VLAN ' Virtual LAN '**.

- **Principe fondamental:** ne permettre les communications entre stations **qu'à l'intérieur d'un réseau virtuel**.

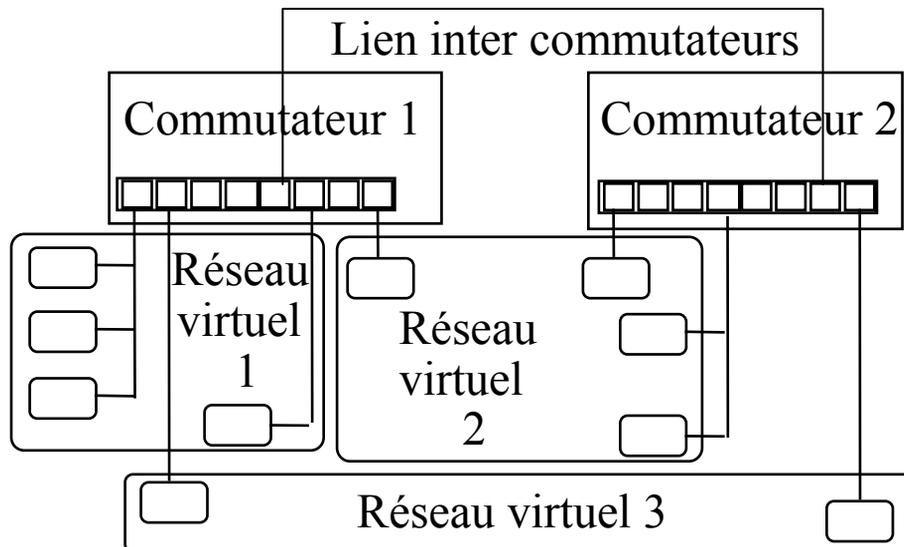
 - Un VLAN définit un sous réseau fermé de stations, un domaine de collision, un domaine de diffusion générale et de diffusion sur groupe.

- Pour communiquer **entre deux réseaux virtuels** il faut passer par **des stations appartenant aux deux VLAN** et utiliser le routage de niveau réseau => dans un système de VLAN, il doit donc être **possible pour une station d'appartenir à plusieurs VLAN**.

Différentes catégories de VLAN

VLAN de type 1 : par ports

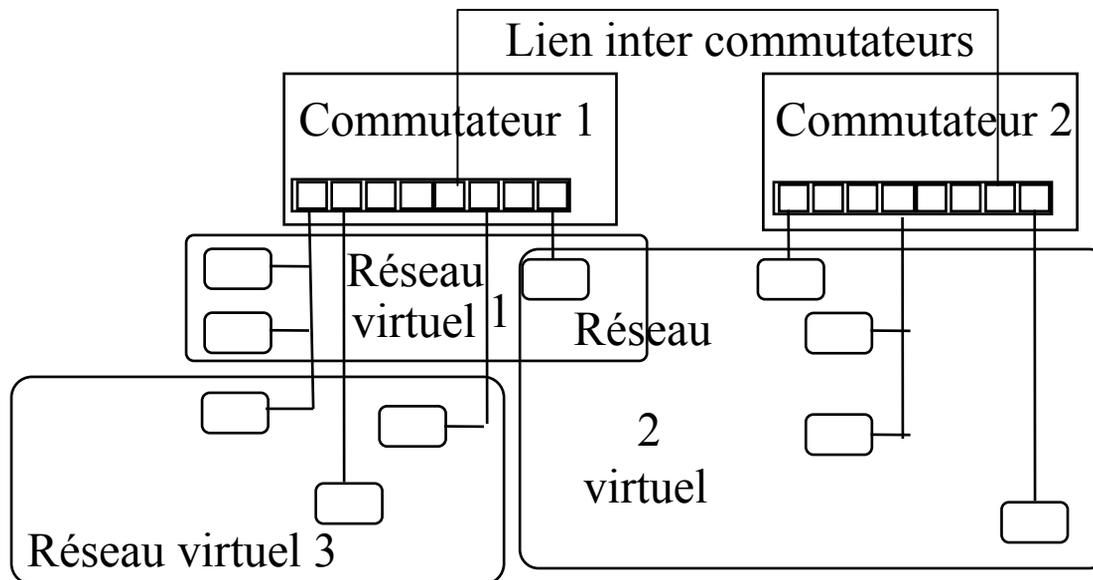
- Les stations connectées à un même port d'un commutateur font **obligatoirement partie du même VLAN**.
- Simplification de la gestion des VLAN: le numéro de VLAN est associé au numéro de port par l'administrateur réseau (notion de VLAN 'port based')
- La sécurité est excellente: **toutes les stations sur un tronçon peuvent communiquer** parce qu'appartenant au même VLAN.



Différentes catégories de VLAN

VLAN de type 2 : par adresses MAC

- Chaque station **caractérisée par son adresse MAC** peut appartenir à un **VLAN donné** (notion de VLAN ' address based ').
- Un administrateur doit décider **l'affectation d'une station à un VLAN**.
- Le numéro de VLAN doit apparaître dans la **table de routage**.



Différentes catégories de VLAN

VLAN de type 3 : par adresses réseaux

- Chaque station est également **caractérisée par son adresse IP**.
- Si le commutateur de réseau local analyse les charges utiles des trames et qu'il s'agit de paquets IP, une station peut appartenir à **un VLAN donné** sur la base de son **adresse IP** (notion de VLAN 'network address based').
- L'administrateur système doit définir les VLAN par des **ensembles d'adresses IP ou des plages d'adresses IP** (des sous réseaux IP).

Autres possibilités de définition des VLAN (si l'on analyse les charges utiles).

- Par **type de protocole** destinataire.
- Par **numéro de port TCP**.
- Par identificateur de **compte utilisateur** (login par exemple en telnet).
-

Fonctionnement des VLAN

Solution des messages de signalisation

- Les commutateurs échangent **des messages de signalisation (courts)** comportant une adresse MAC et le numéro de réseau virtuel associé pour mise à jour des tables de routage.

- Un message de signalisation est **généré lors de la mise sous tension** d'une station et propagé à tous les commutateurs du réseau.

- Les tables de routage sont **échangées périodiquement**.

- Problèmes de performances **si le réseau est grand** :

- **Surcharge d'échanges** de messages de signalisation

- **Taille des tables de routage et coût de la recherche en table.**

Fonctionnement des VLAN: Solution de l'estampillage de trames

La norme 802.1 Q (' Frame tagging ')

■ **Estampillage:** ajouter à la trame Ethernet (après l'adresse source) des informations (4 octets) définissant le VLAN de l'émetteur.

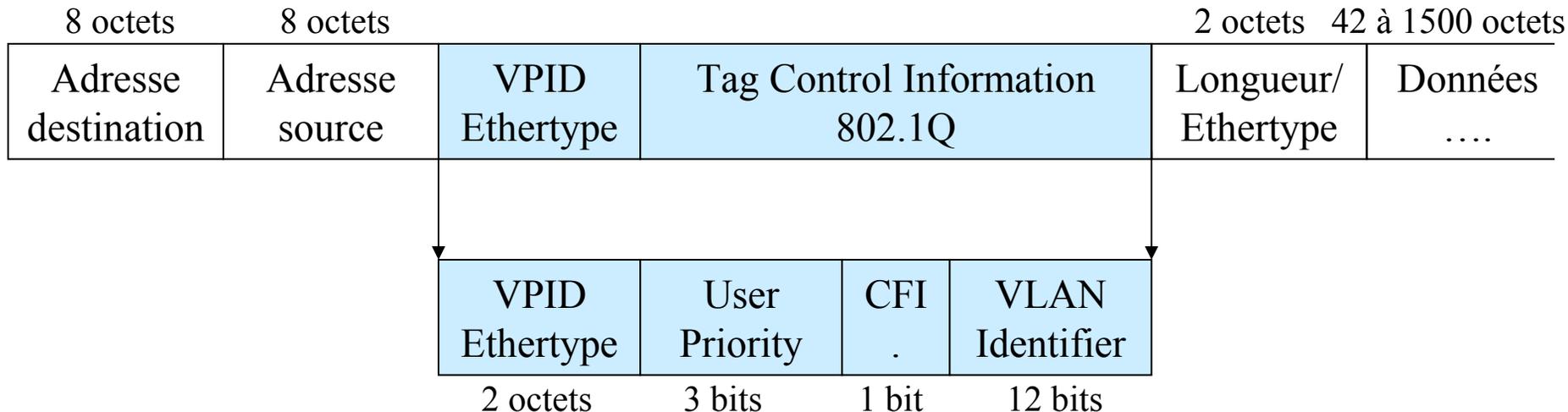
8 octets	8 octets		4 octets	2 octets	42 à 1500 octets
Adresse destination	Adresse source	VPID Ethertype	Tag Control Information 802.1p/Q	Longueur/ Ethertype	Données

■ **Solution de VLAN par ports:** Pour éviter les problèmes en cas de diffusion un seul VLAN est défini par port (la solution ne concerne que les VLAN de type 1).

■ **Connaissance des commutateurs:** VLAN d'appartenance des stations qui lui sont connectés (en fait VLAN des ports du commutateur).

■ **Utilisation des estampilles:** uniquement pour les échanges entre commutateurs ce qui évite les problèmes dus au fait de rallonger la taille maximum de la trame Ethernet de 1518 à 1522 octets.

Approfondissement: signification des différents champs



- **Champ VPID** ('VLAN Protocol Identifier'): Code ETHERTYPE fixé à 0x8100.
- **Champ UP** (' User Priority '): 3 bits permettant de définir 8 niveaux de priorité pour une trame (sans rapport avec les VLAN mais introduit à propos d 'une modification du format de la trame Ethernet).
- **Champ CFI** (' Canonical Format Identifier '): Indique pour le routage par la source que le format est standard.
- **Champ VID** ('Vlan Identifier'): Indique pour quel VLAN circule la trame (12 bits).

Approfondissement: fonctionnement de base de l'estampillage de trames:

- **Réception de trame non estampillée:** le commutateur affecte le numéro de VLAN du port d'arrivée (ou un numéro par défaut en l'absence de configuration).
- **Réception d'une trame estampillée:** générée soit par un commutateur 802.1 Q soit par une station capable de générer le format 802.1Q. Le commutateur considère le VLAN de l'estampille (VLAN pour lequel circule la trame)
- **Décision de routage** (' forwarding decision ')
 - Trame Broadcast, Multicast et Unicast destinataire encore inconnu: la trame est renvoyée sur tous les ports ayant même VLAN que la trame.
 - Trame Unicast de destinataire connu: la trame est renvoyée sur le port destinataire si le VLAN du port correspond au VLAN de la trame.
- **D'autres stratégies** propriétaires peuvent être implémentées par des commutateurs pour des VLAN par adresses.

Conclusion : avantages et inconvénients des réseaux locaux virtuels

■ Avantages des réseaux virtuels:

- Améliorer **la sécurité** en limitant la circulation des trames (totale indépendance des trafics sur un câblage commun).
- Améliorer **les performances** en limitant l'étendue des diffusions au réseau virtuel d'appartenance de l'émetteur.
- Améliorer **la gestion de la configuration** du réseau: définition des groupes d'utilisateurs sans se soucier de l'endroit où ils sont connectés.

■ Inconvénients des réseaux virtuels:

- Lourdeur de **l'administration**.
- **Contrainte** des mécanismes de sécurité sur les usagers.
- **Ralentissement** des communications entre réseaux virtuels.

Commutation de réseaux locaux



Conclusion

Commutateurs de réseaux locaux: Avantages (1)

- **Organisation** : S'adapte à toute topologie existante, organisée par tronçons de réseaux, en reliant des ensembles de matériels dispersés géographiquement sur des tronçons de réseaux locaux séparés.

- **Extension en distance** : On peut s'affranchir des contraintes de distance maximum des réseaux locaux par des liaisons spécialisées entre commutateurs.

- **Extension en performances** :

- Limitation du trafic aux tronçons concernés ,
- Limitation des domaines de collision ,
- Possibilité de limitation des diffusions avec les réseaux locaux virtuels.

- **Sécurité** : On peut interdire sélectivement le franchissement des commutateurs. En particulier le mode écoute générale des réseaux locaux ("promiscuous") qui permet beaucoup de piratage peut-être très réduit avec les réseaux locaux virtuels.

Commutateurs de réseaux locaux: Avantages (2)

- **Tolérance aux pannes** : Approche très tolérante puisqu'elle sépare différents tronçons qui peuvent s'arrêter séparément (possibilité de traiter par exemple le problème des avalanches ou tempêtes de diffusion).

- **Interconnexion de réseaux locaux hétérogènes** : Possibilité de supporter plusieurs standards de réseaux locaux ayant des formats de trames voisines (par exemple type IEEE 802) en résolvant néanmoins des problèmes non négligeables d'hétérogénéité.

- Adressage (unification autour de l'adressage IEEE 802)
- Débits 802.3 10 Mb/s , 100 Mb/s 802.5 16 Mb/s ("Token ring") 802.11
- Taille maximum des trames 1500 ou 4500 octets ... Segmentation non prévue au niveau liaison.

- **Coûts**: plus importants que pour les répéteurs mais très supportables et en diminution constante.

Commutateurs de réseaux locaux: Inconvénients

- **Retards** : Lors de la traversée des commutateurs.
- **Limitation dues aux tailles des tables de routage** : le nombre des adresses utilisables n'est pas illimité (existence de tables dont la taille ne peut-être arbitraire).
- **Limitation du débit supporté** : un commutateur peut entrer en surcharge ou en congestion en cas de pic de trafic => Nécessité d'assurer un dimensionnement correct d'une architecture de commutateur.
- **Une administration un peu plus complexe** : malgré le mode transparent en cas d'utilisation des réseaux virtuels.

Ensemble d'inconvénients faibles en regard des avantages