

INSA CVL

ARCHITECTURE DES RÉSEAUX

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
CENTRE VAL DE LOIRE

RESEAUX INFORMATIQUES

EUROMED

**A.ABDALLAH
2019/2020**



Version 2.0

ARCHITECTURE DES RÉSEAUX

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES

- **CARATERISTIQUES D'UN RÉSEAU INFORMATIQUE**
- **INTERNET**
- **BASES DES RÉSEAUX IP**

Définition

- **Un réseau** est un ensemble d'équipements (ordinateurs, imprimantes, ...) interconnectés qui servent à acheminer un flux d'informations.

- Attention ! Le terme réseau peut désigner :
 - L'ensemble des machines,
 - Le protocole de communications,
 - La manière dont les équipements sont connectés.

 **LES OBJETS RELIÉS SONT APPELÉS : NŒUDS DU RÉSEAU..**

Échelle géographique

- PAN : Personal Area Network
 - Réseau personnel (< dizaine de machines).
- LAN : Local Area Network
 - A l'échelle d'un bâtiment (ex: Département STI).
- MAN : Metropolitan Area Network
 - A l'échelle d'une ville ou d'un campus (ex : INSA).
- WAN : Wide Area Network
 - A l'échelle d'un pays ou mondiale (ex: Renater).

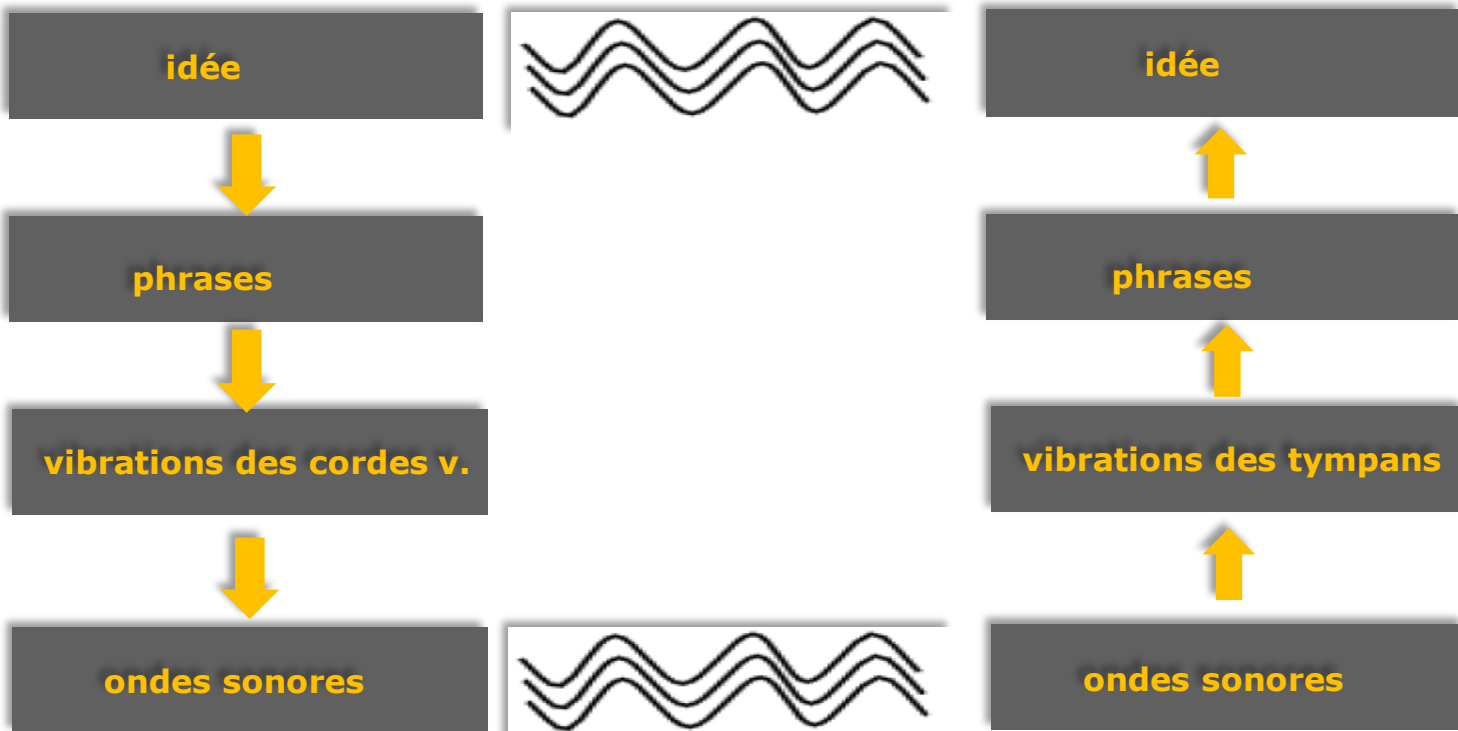
 **Internet**

Internet

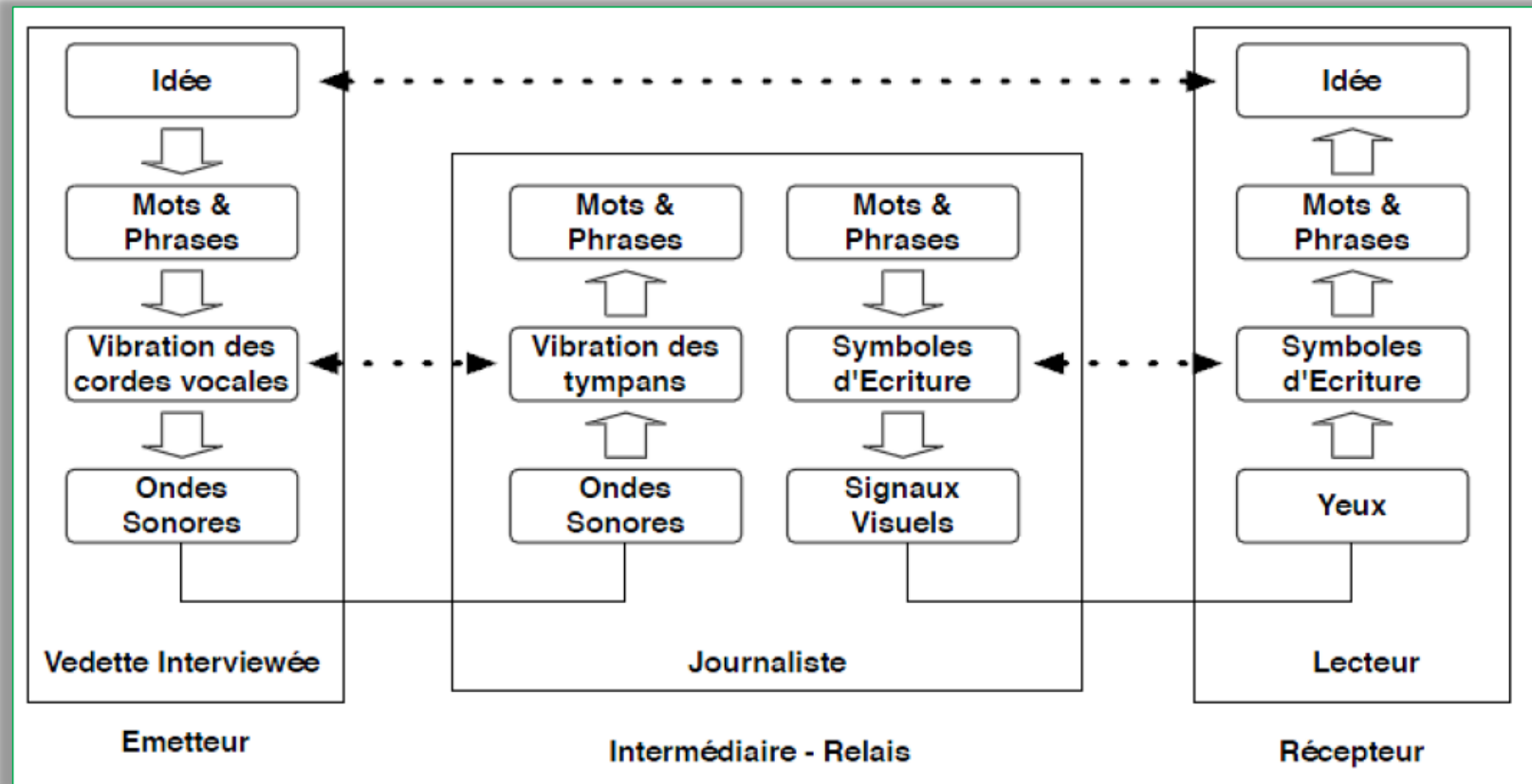
- **Internet est un nom générique signifiant Interconnexion de Réseaux :**
 - Regroupement d'un ensemble de réseaux:
 - réseaux locaux (universités et entreprises)
 - réseaux métropolitain (campus, ville, agglomération)
 - réseaux régionaux aramis
 - réseaux nationaux renater
 - Le plus grand réseau informatique du monde relie une communauté mondiale en pleine expansion
 - Géré de manière décentralisée et pragmatique (coopération et réciprocité)

L'art de communiquer

- Communication entre humains



L'art de communiquer



Communication binaire

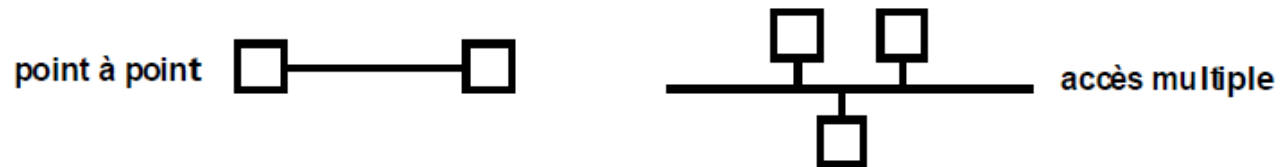
- Un ordinateur manipule des d'informations diverses, représentées sous *forme binaire*
- On appellera ces informations binaires des *données*.
- La communication entre ordinateurs fonctionne grâce à des mécanismes équivalents à ceux décrits jusqu'ici pour la communication entre les êtres humains.

Types de réseaux

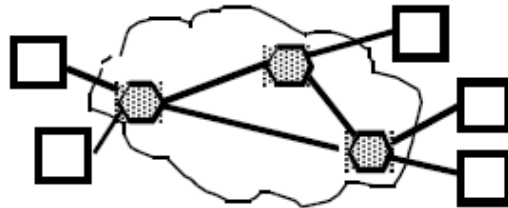
- Les réseaux peuvent être classés selon différents critères

- Nature de la liaison entre les organes connectés (nœuds)

- **Liaison directe** : il y a un lien direct entre deux nœuds du réseau



- **Liaison commutée** : la liaison passe par des organes intermédiaires



- Les supports physiques de la communication peuvent être divers
 - paires de fils, câble coaxial, fibre optique, radio, infra-rouge, etc.
- Couverture géographique (réseau local, à grande distance, etc.)

Performance des réseaux

- Deux mesures principales de performance
 - Débit (*throughput*) : quantité d'information par unité de temps. Unité : bit/s (Kbit/s, Mbit/s, ...)
 - une mesure corrélée au débit est la bande passante (Hz, KHz, ...)
 - Latence (*latency*) : temps écoulé entre l'émission d'un bit et sa réception. Unité : s (ms, μ s, ...)
 - on s'intéresse aussi parfois au temps d'aller-retour (*round trip time* ou RTT)
 - Facteurs de performance

latence = durée de transmission + temps de propagation + temps d'attente

- Durée de transmission : taille du message/débit
 - c'est le temps nécessaire pour transmettre les données (les envoyer sur le réseau)
- Temps de propagation : distance / vitesse de propagation
 - c'est le temps nécessaire pour que les données aillent de l'émetteur au récepteur
- Temps d'attente
 - c'est le temps "perdu" par le système de communication (notamment à cause de l'occupation des ressources)
- La somme (temps de propagation + temps d'attente), ou latence de base, est un délai incompressible (temps écoulé avant de recevoir le 1-er bit d'un message)

Performance des réseaux

- Débit et latence ont un impact variable selon les applications

- Exemple 1 : message bref (interaction question-réponse)

Envoi 1 Kbit, retour 1 Kbit, distance 10 000 km.

- *Temps incompressible d'aller retour = 100 ms (si vitesse = $2c/3$).*
- *Temps de transmission = 1 ms à 1 Mbit/s, 0,01 ms à 100 Mbit/s.*
- *Conclusion : la latence est dominante, le débit a peu d'influence*

- Exemple 2 : message très gros (fichier multimédia)

Envoi 100 Mbit, distance 10 000 km.

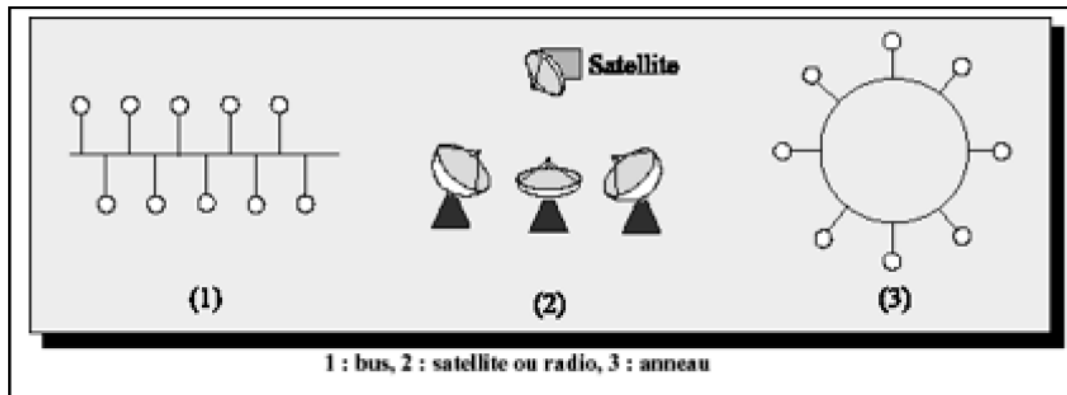
- *Temps incompressible de propagation = 50 ms.*
- *Temps de transmission = 100 s à 1 Mbit/s, 1 s à 100 Mbit/s.*
- *Conclusion : le débit est dominant, la latence a peu d'influence*

Performance des réseaux

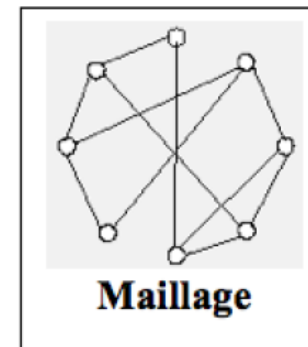
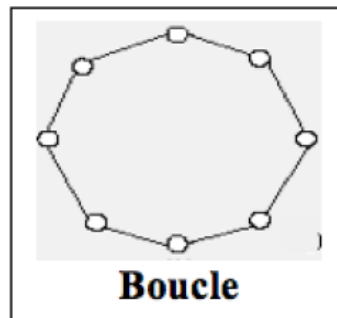
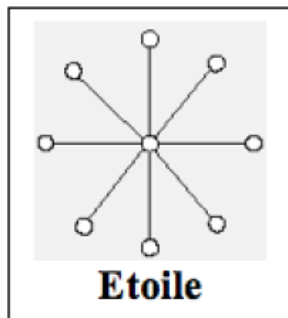
- Vous vous êtes sur Mars avec votre équipage spatial. Vous vouliez envoyer une vidéo sympa que vous avez fait à votre famille sur Terre. Donc, vous envoyez ce fichier vidéo de 20 Go via une liaison satellite, qui a une capacité de 512 Gbps. La Terre est à 55 Gm de Mars et la lumière voyage à la vitesse de 3×10^8 m/s.
 - Après combien de secondes, votre famille recevra-t-elle le premier bit, en ignorant la charge protocolaire (c.-à-d. les bits d'en-tête ne comptent pas).
 - Après combien de secondes, votre famille recevra-t-elle le fichier complet, en ignorant la charge protocolaire (c'est-à-dire que les bits d'en-tête ne comptent pas).

Modes de communication

- **Mode diffusion multipoint : Un émetteur => Plusieurs récepteurs**



- **Mode point à point : Un émetteur => Un récepteur**

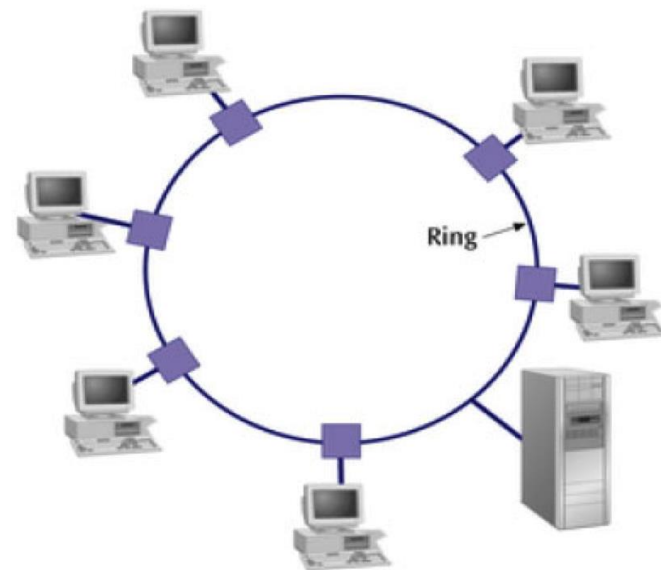


Topologie des réseaux

■ Anneau

- Un nœud est connecté à 2 autres nœuds. Chaque nœud émet chacun à son tour.
- Chaque nœud est connecté au suivant en point à point
- L'information circule dans un seul sens, chaque station reçoit le message et le régénère. Si le message lui est destiné, la station le recopie au passage.
- Ce type de connexion autorise des débits élevés et convient aux grandes distances (régénération du signal par chaque station)
- L'anneau est sensible à la rupture de la boucle

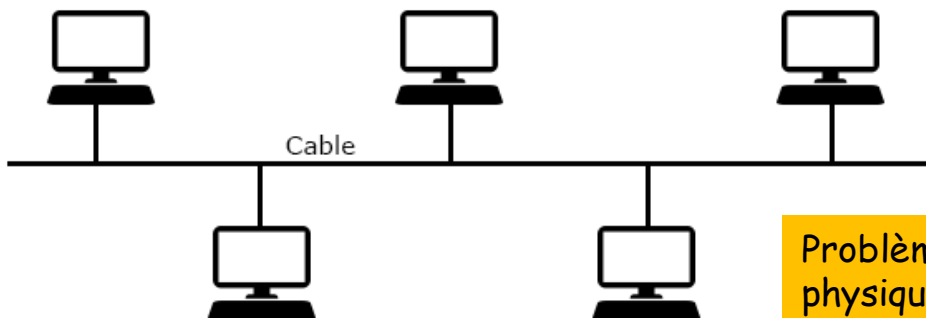
si une machine tombe en panne, le réseau est coupé.



Topologie des réseaux

▪ Bus

- Tous les nœuds communiquent avec tous les autres en partageant le même média physique (e.g câble). Le bus est une variante de la liaison multipoint
- L'information émise est diffusée sur tout le réseau
- Chaque nœud accède directement au réseau, d'où des problèmes d'accès
- Les réseaux en bus autorisent des débits importants > 100Mbits/s sur 100m
- possibilité d'insérer une station sans perturbation de la communication
- La longueur de bus est limitée par l'affaiblissement du signal, il est nécessaire de régénérer celui-ci régulièrement

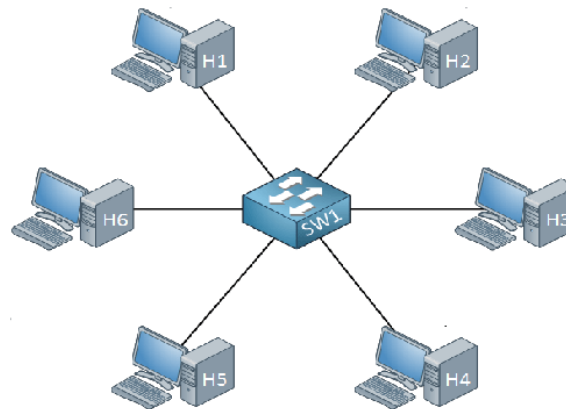


Problème de partage du support physique (collisions).

Topologie des réseaux

▪ Etoile

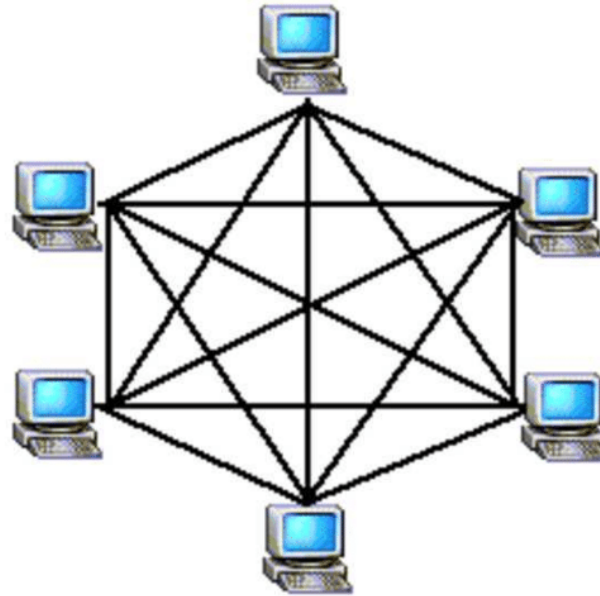
- Un nœud concentre le traitement des requêtes
- La topologie étoile est une variante en point à point: un nœud central émule n liaisons point à point
- Tous les nœuds de réseau sont reliés à un nœud central commun: le concentrateur.
- Tous les messages transitent par ce point central
- La défaillance d'un poste n'entraîne pas celle du réseau, cependant le réseau est très vulnérable à celle du nœud central



la fiabilité du réseau est conditionnée par le nœud central

Topologie des réseaux

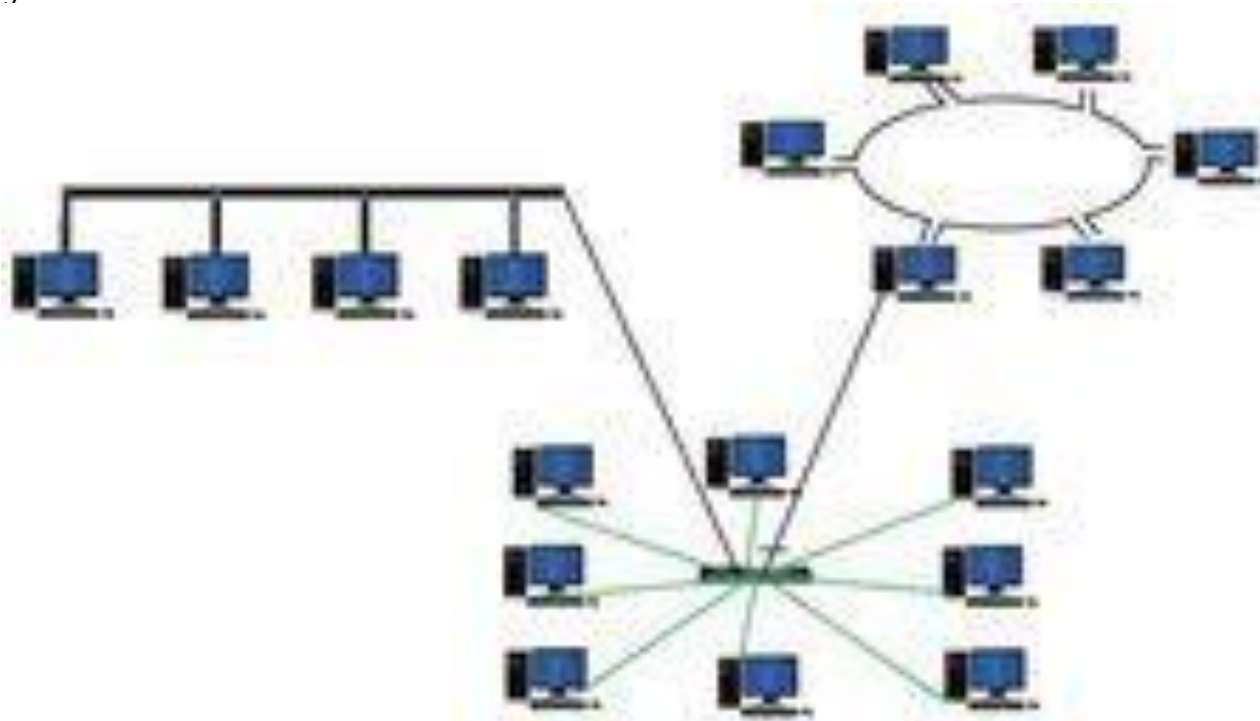
- Maillé



nécessite beaucoup de câbles (pour n machines, il faut $n(n-1)/2$ câbles),

Topologie des réseaux

- Hybride



Équipements réseaux

- **Les principaux équipements matériels mis en place dans les réseaux sont :**
 - Les répéteurs,
 - Les concentrateurs (hubs),
 - Les ponts (bridges),
 - Les commutateurs (switches)
 - Les passerelles (gateways), permettant de relier des réseaux locaux de types différents (hétérogène)
 - Les routeurs, permettant de relier de nombreux réseaux locaux de telle façon à permettre la circulation de données d'un réseau à un autre de la façon optimale

Équipements réseaux

■ Les répéteurs

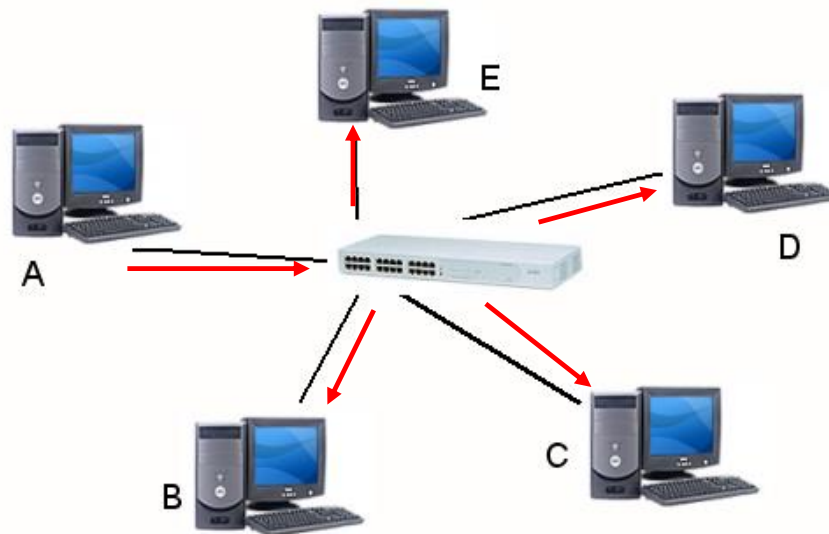
- But : régénération du signal et récupération d'horloge.
- Le répéteur n'est pas un organe intelligent capable d'apporter des fonctionnalités supplémentaires
- Le répéteur ne fait qu'augmenter la longueur du support physique (accroître la portée géographique d'un réseau).
- Le répéteur peut également constituer une interface entre deux supports physiques de types différents : par exemple un segment en câble à paires torsadées avec un segment en fibre optique.



Équipements réseaux

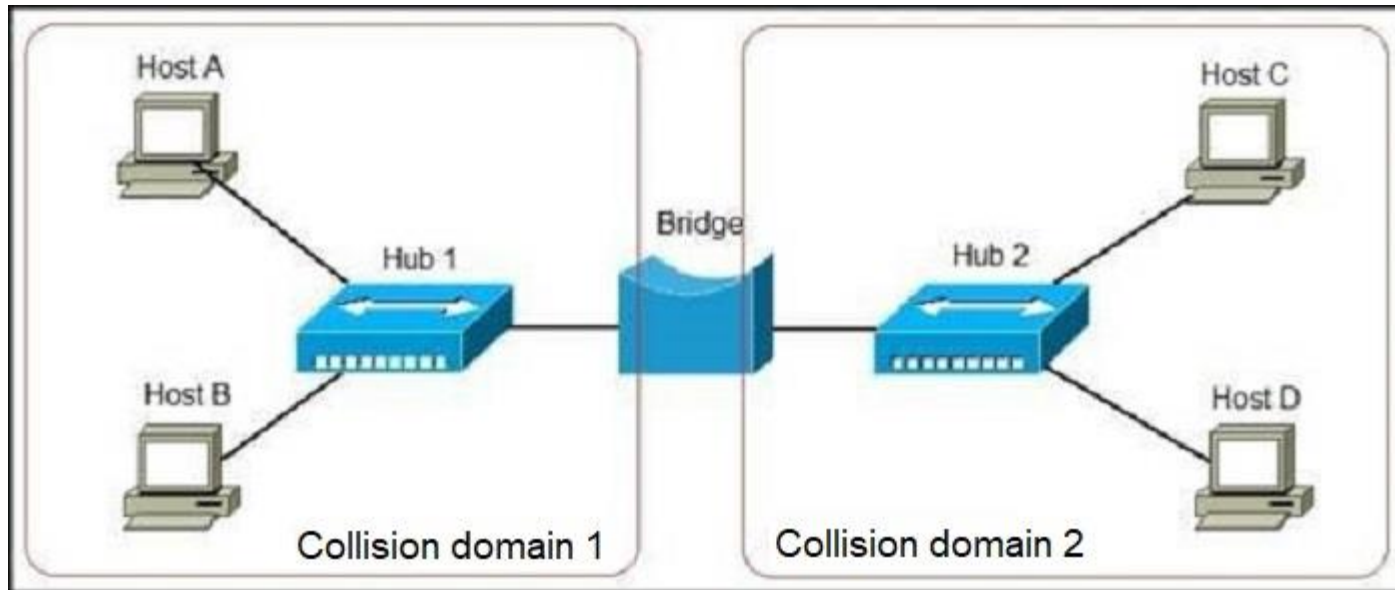
■ Le concentrateur

- But : Un concentrateur (répéteur multi port) permet, comme son nom l'indique, de concentrer le trafic provenant de différents équipements terminaux.
- Cela peut se réaliser par une concentration du câblage en un point donné ou par une concentration des données qui arrivent simultanément par plusieurs lignes de communication.
- Il est lui-même connecté sur un réseau plus puissant pour y faire transiter le trafic qu'il a concentré.
- Le concentrateur ou hub est aussi connu sous le nom de répéteur multiport.



Équipements réseaux

- Les ponts

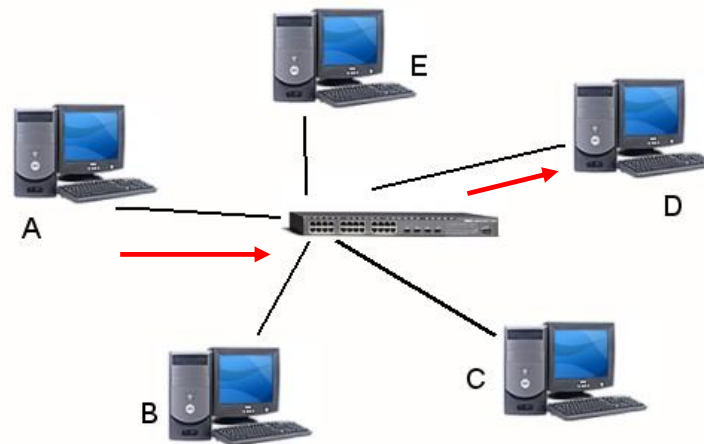


Équipements réseaux

- Les commutateurs (switches):
 - Un commutateur ou switch est également appelé pont multiport.
 - Différence entre le concentrateur et le commutateur : le commutateur prend des décisions en fonction des adresses MAC tandis que le concentrateur ne prend aucune décision.
 - Cet équipement agit au niveau 2 du modèle OSI. Identiquement à un HUB, sa fonction est d'interconnecter plusieurs cartes d'interfaces ensembles. Cependant, lorsqu'il réceptionne une trame, il compare l'adresse MAC de destination avec sa table de correspondance. Ainsi, il ne diffuse cette trame uniquement sur le port physique concerné.

Équipements réseaux

- Les commutateurs (switches):
 - Quand la station A envoie un message à la station D, le commutateur ne le transmet qu'à son destinataire.



- C'est par auto-apprentissage que le commutateur identifie la « position » des stations.
- Le commutateur prend des décisions.

Équipements réseaux

- Les routeurs
 - Prend des décisions selon des groupes d'adresses réseau (classes), par opposition aux adresses matérielles individuelles.
 - Peut aussi connecter différentes technologies telles qu'Ethernet, Token Ring et FDDI.
 - Rôle : examiner les paquets entrants, choisir le meilleur chemin pour les transporter sur le réseau et les commuter ensuite au port de sortie approprié.
 - Sur les grands réseaux, les routeurs sont les équipements de régulation du trafic les plus importants.
 - Ils permettent pratiquement à n'importe quel type d'ordinateur de communiquer avec n'importe quel autre dans le monde !

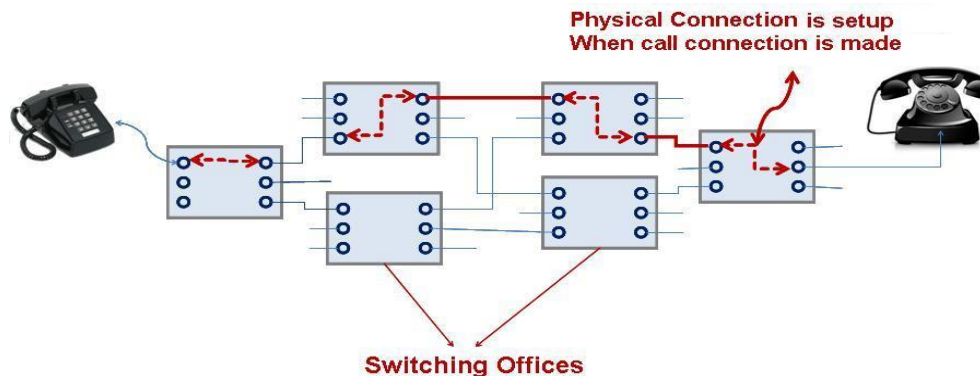
Techniques de commutation

- Le concept de base de réseau à commutation est né de la nécessité de mettre en relation un utilisateur avec n'importe quel autre utilisateur (relation 1 à 1 parmi n ou interconnexion totale):



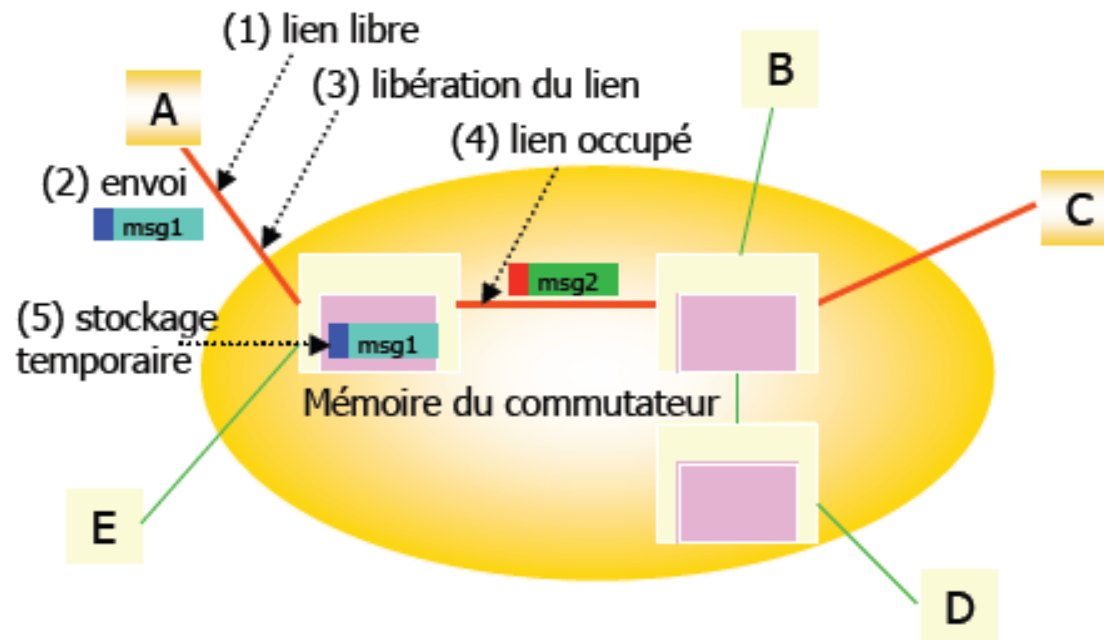
Il existe 4 techniques de commutation :

- Commutation de circuits (ex: le téléphone)** : Un chemin physique est établi à l'initialisation de la communication entre l'émetteur et le récepteur et reste le même pendant toute la durée de la communication. Si les deux correspondants n'ont pas de données à transmettre pendant un certain temps, la liaison restera inutilisée.



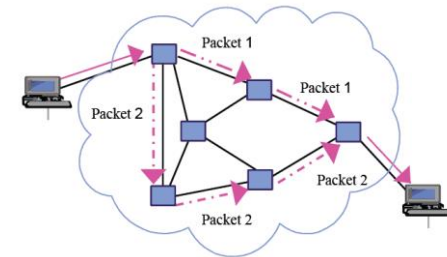
Techniques de commutation

- **Commutation de messages** : Un message est un ensemble d'information logique formant un tout (fichier, mail) qui est envoyé de l'émetteur vers le récepteur en transitant nœud à nœud à travers le réseau. On a un chemin logique par message envoyé. Le message ne peut être envoyé au nœud suivant tant qu'il n'est pas reçu complètement et sans erreur par le nœud actuel.



Techniques de commutation

- **Commutation de paquets** : optimisation de la commutation de message qui consiste à découper les messages en plusieurs **paquets** pouvant être acheminés plus vite et indépendamment les uns des autres. Cette technique nécessite la mise en place de la numérotation des paquets.



- Chaque message est découpé en morceaux de taille variable (avec un maximum) appelé **PAQUET** qui sont acheminés individuellement comme dans la commutation de message.
- Contrairement à la commutation de messages, il n'y a pas de stockage d'information dans les nœuds intermédiaires, chaque nœud, recevant un paquet, le réémet immédiatement sur la voie optimale (séquençement n'est plus garanti).
- Pour reconstituer le message initial, le destinataire devra, éventuellement, réordonner les différents paquets avant d'effectuer le réassemblage
- Chaque paquet doit contenir les informations nécessaires à son acheminement

Techniques de commutation

- **Commutation de cellule** : commutation de paquets particulière. Tous les paquets ont une longueur fixe (1 paquet = 1 cellule de 53 octets dans ATM). Un chemin est déterminé pour la transmission des cellules.
 - Commutation de cellule = superposition de 2 types de commutation : commutation de circuit et commutation de paquets.

Techniques de commutation

- Acheminement en mode **circuit virtuel ou mode connecté**
 - exemple : Transpac
 - un chemin est établi à l'avance (le Circuit Virtuel)
 - les paquets sont reçus dans l'ordre (même chemin pour tous)
 - décision d'acheminement plus rapide (la route est connue)
 - réalisation plus difficile
 - compromis entre la commutation de circuits et la commutation de paquets en mode datagramme
 - garantie de séquençement

Techniques de commutation

Le mode Circuit Virtuel (ATM, Frame Relay)

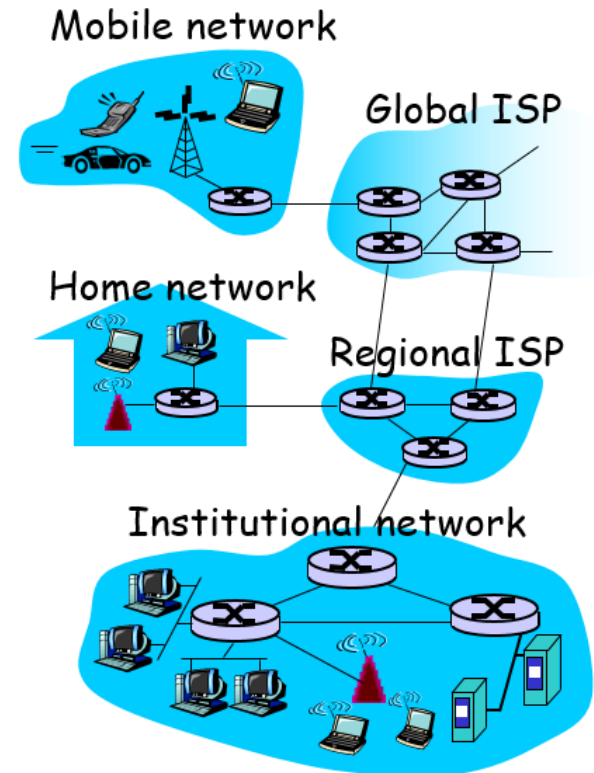
- **avantages :**
 - séquençement des paquets garanti
 - court en-tête, acheminement plus rapide

- **inconvénients :**
 - chaque connexion ouverte consomme des ressources même si aucun paquet ne circule
 - une seule route possible: pas de contournement des zones congestionnées
 - perte de tous les circuits en cas de défaillance d'un routeur

Techniques de commutation

Le mode Datagramme (Internet)

- **avantages :**
 - plus robuste (plusieurs routes possibles)
 - résistance aux défaillances de routeur
 - en cas de crash d'un routeur, perte uniquement des paquets en cours de traitement
 - adaptabilité aux congestions
 - répartition de la charge
- **inconvénients :**
 - risque accru de congestion
 - arrivée désordonnée des paquets
 - décision d'acheminement sur chaque paquet



Techniques de commutation

- Quelque soit l'architecture, on a deux modes de communications :
 - Avec connexion (permanente) => **demande de connexion**
 - Sans connexion (**Sans demande de connexion**)

Supports de transport

Permet de transporter des données sous forme de signaux. 2 type de support :

- **Supports avec un guide physique :**

- Paire téléphonique / torsadée
- Câble coaxial (bande de base, large bande)
- Fibre optique (transmission point à point , 10Gbps à 100Gbps)

- **Supports sans guide physique :**

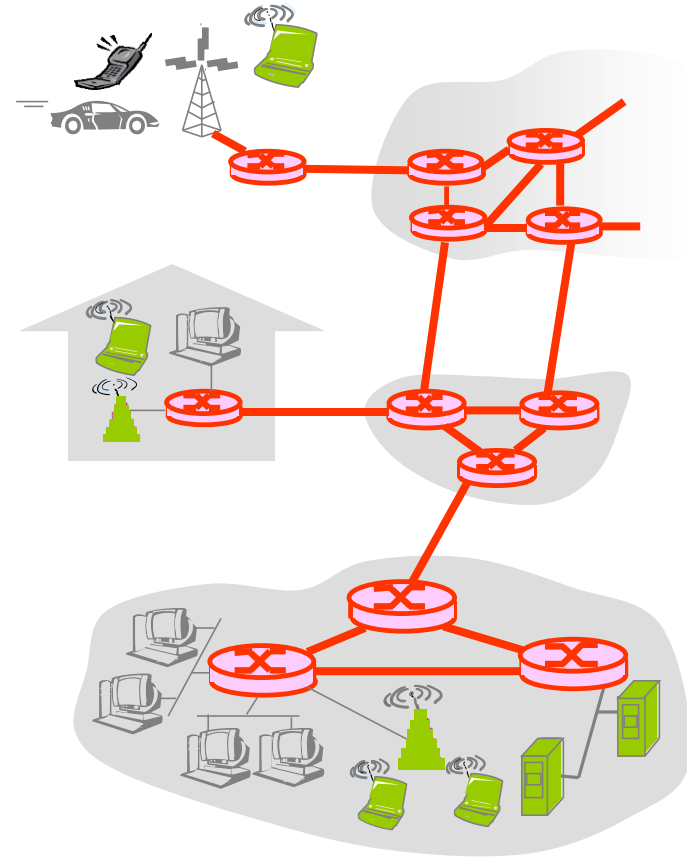
- **Faisceau hertzien**
 - LAN (e.g., Wifi)
 - 11Mbps, 54 Mbps
 - wide-area (e.g., cellular)
 - 3G cellular: ~ 1 Mbps
- **Liaison satellite**

Bande passante d'un support :

bande de fréquences dans laquelle les signaux sont «convenablement» transmis.

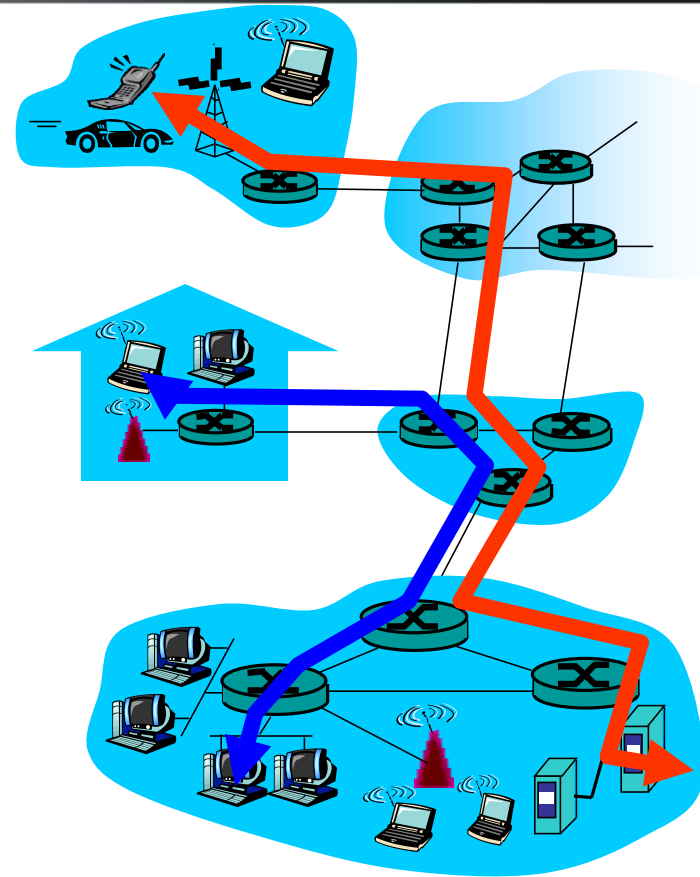
Network core

- Maillage de routeurs interconnectés
- **La question fondamentale:** comment les données sont-elles transférées via le réseau?
 - Commutation de circuits
 - Commutation de paquets



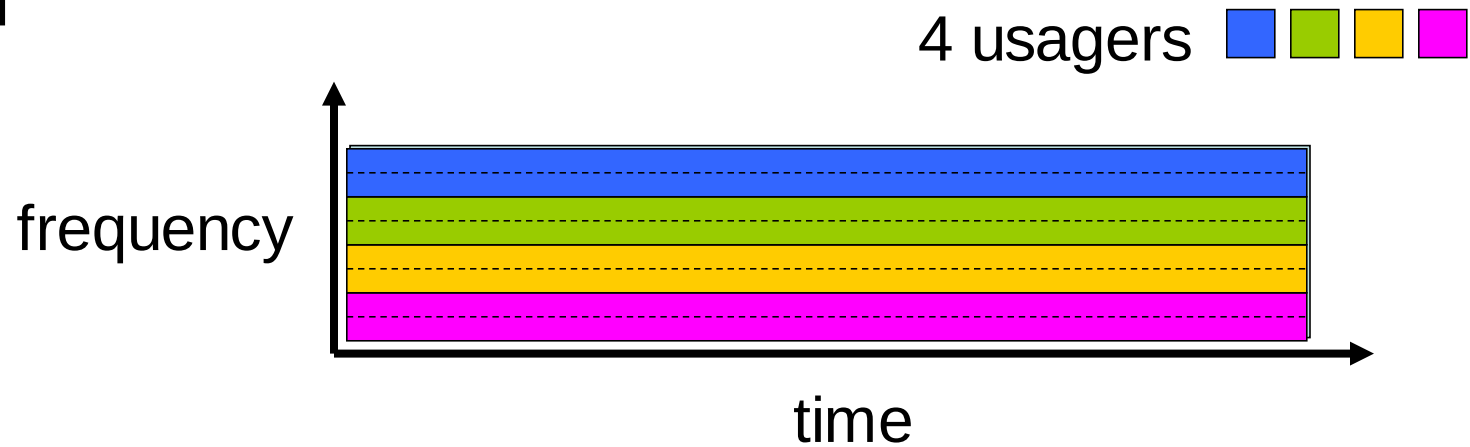
Network core : commutation de circuits

- Ressources d'extrémité réservées pour l'appel
 - bande passante de liaison, capacité de commutation
 - ressources dédiées: pas de partage
 - initialisation d'appel requise
 - Ressources réseau (par exemple, bande passante) divisées en «morceaux»
 - FDM
 - TDM

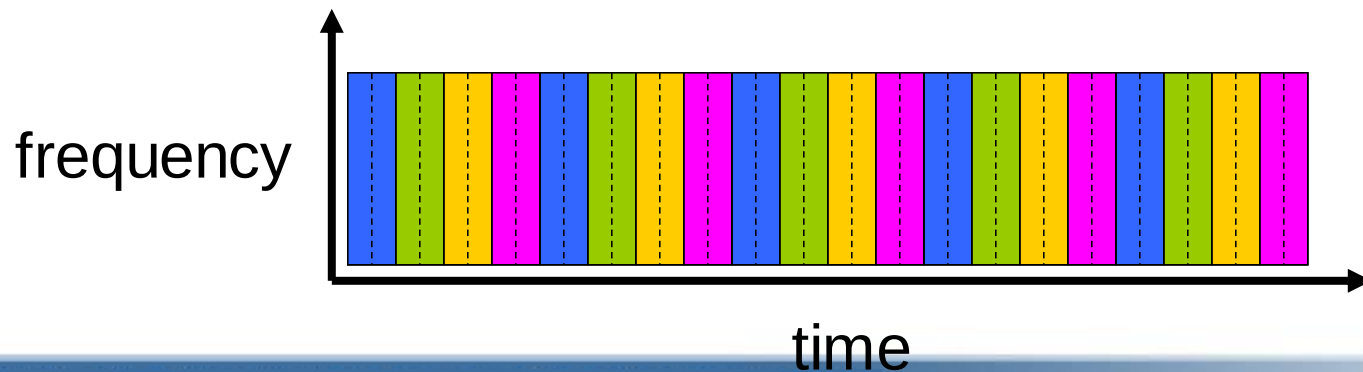


Network core : commutation de circuits

FDM



TDM

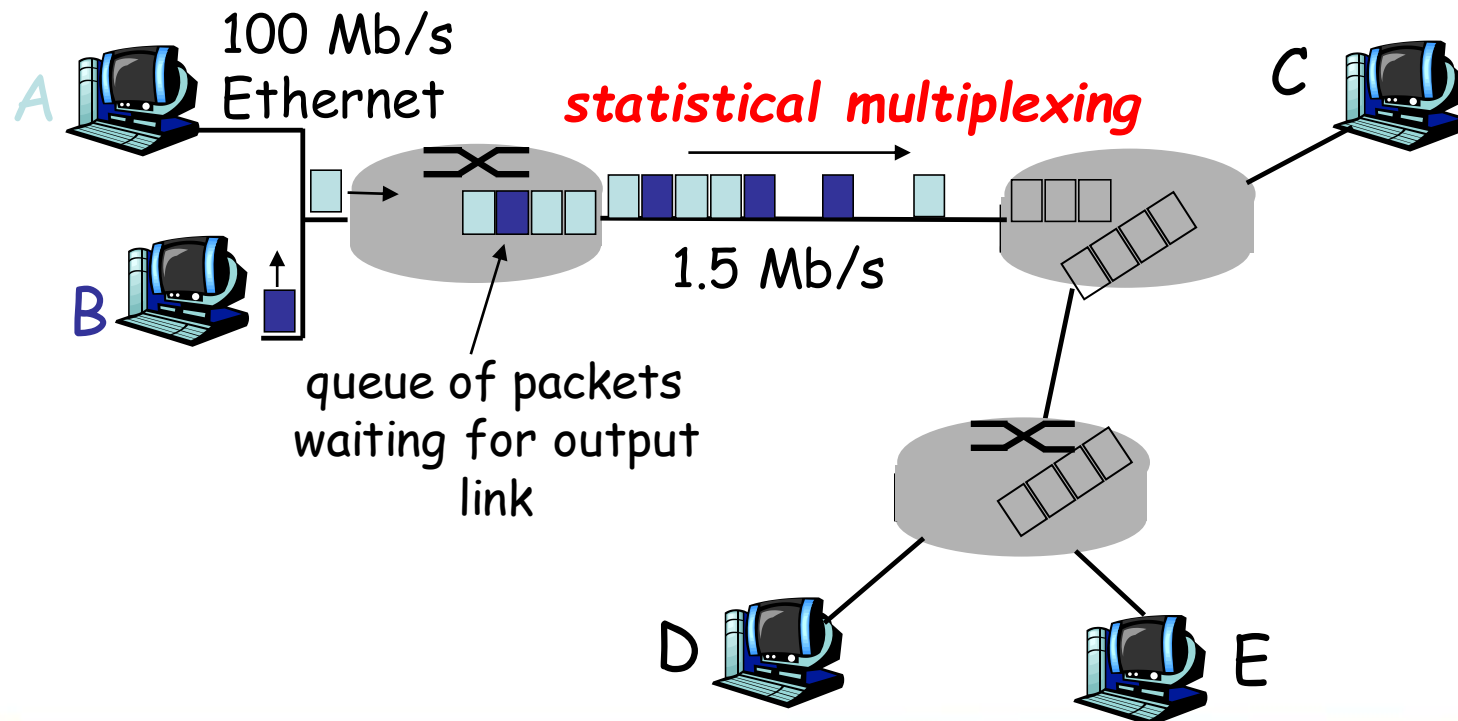


Network core : commutation de circuits

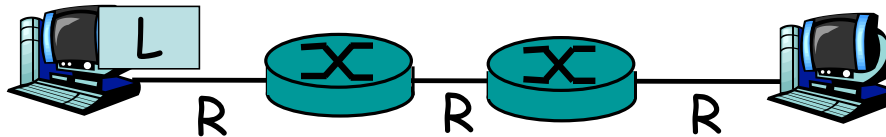
- **Combien de temps** faut-il pour envoyer un fichier de 640 000 bits de l'hôte A à l'hôte B sur un réseau à commutation de circuits?
 - Tous les liens sont de 1,536 Mbps
 - Chaque lien utilise TDM avec 24 slots/s
 - 500 ms pour établir un circuit de bout en bout

Network core : commutation de paquets

- Flux de données d'extrémité divisé en paquets
- Chaque paquet utilise la totalité de la bande passante du lien disponible
- Partage des ressources, Congestion
- Store and forward: Les paquets font un « saut » à la fois



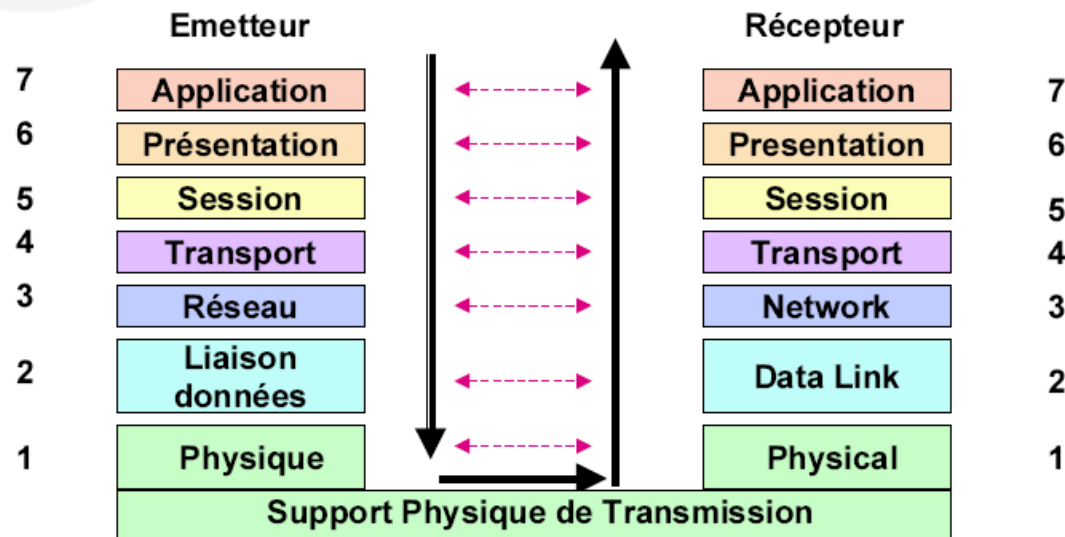
Network core : commutation de paquets



- prend L/R secondes pour transmettre (pousser) le paquet de L **bits** sur une liaison à R **bps**
- Exemple:
 - $L = 7.5$ Mbits
 - $R = 1.5$ Mbps
 - Délai de transmission = 15 sec

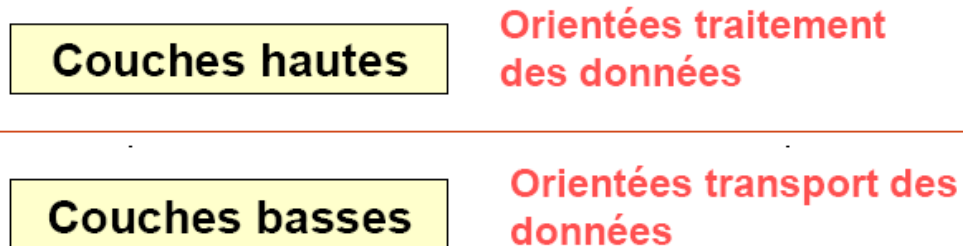
Normalisation OSI

- Le transport des données d'une extrémité à une autre d'un réseau nécessite un support physique ou hertzien de communication.
- Pour que les données arrivent correctement au destinataire, avec la qualité de service, ou QoS (Quality of Service), exigée, il faut en outre une architecture logicielle chargée du contrôle des paquets dans le réseau.



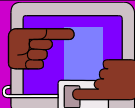
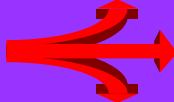
Structuration du modèle en couches

- les couches hautes sont chargées d'assurer l'inter-fonctionnement des processus applicatifs distants, ce sont les couches orientées traitement des données.



- les couches basses fournissent aux couches hautes un service de transport fiable de données, déchargeant les couches hautes de la gestion de tous les mécanismes de transfert d'information.

Structuration du modèle en couches

Couche	Description
7 - Application 	Transparence du réseau et distribution du traitement
6 - Présentation 	Compression, conversion et encodage des données
5 - Session 	Gestion des connexions logiques
4 - Transport 	Segmentation des données et séquençement des transmissions
3 - Réseau 	Aiguillage des paquets et contrôle du trafic
2 - Données 	Formation des paquets physiques et vérification des transmissions
1 - Physique 	Câblage, carte réseau, équipements physiques

Description des sept couches du modèle OSI

- Les couches basses garantissent aux couches hautes que le transfert d'information se réalise correctement.
- Il est donc nécessaire que la dernière couche basse destination s'assure, avant de délivrer les données aux couches applicatives, que celles-ci sont correctes (contrôle de bout en bout).
- Les autres couches inférieures n'effectuent qu'un transfert de proche en proche entre systèmes.
- **La couche Physique** : Elle assure la transmission des signaux binaires (suite de bits) entre les équipements reliés par un support.
- **La couche Liaison (de données)** : Elle assure la transmission des données structurées et fiabilisées en blocs (trames) entre des stations directement reliées par une liaison de données.

Description des sept couches du modèle OSI

- **La couche Réseau** : Elle concerne l'acheminement des données (paquets) à travers tout le réseau en passant éventuellement par des stations intermédiaires ou par des sous-réseaux. Cette couche est chargée de traiter les informations de commutation ou de routage associées au paquet.
- **La couche Transport** : C'est elle qui est chargée de préparer les données à être transportées. Elle gère entre autres le **contrôle de flux** (en indiquant à la machine distante qu'elle doit ralentir ses émissions), la **correction d'erreurs**, la **détection des pertes et des duplications**, la **recupération des informations correctes**, pour offrir si nécessaire, un service fiable à la couche supérieure, la **division des données** des applications en segments de taille adaptée aux couches inférieures. Le niveau transport s'occupe d'établir une liaison pour le compte de la couche session, de gérer le transfert de données, puis libérer la connexion.

Description des sept couches du modèle OSI

- **A partir de niveau 5**, on entre dans le domaine des couches orientés application.
- Ces couches n'assurent, globalement, que l'organisation des échanges et fournissent les mécanismes nécessaires à assurer **l'interfonctionnement d'une ou plusieurs applications distantes**.

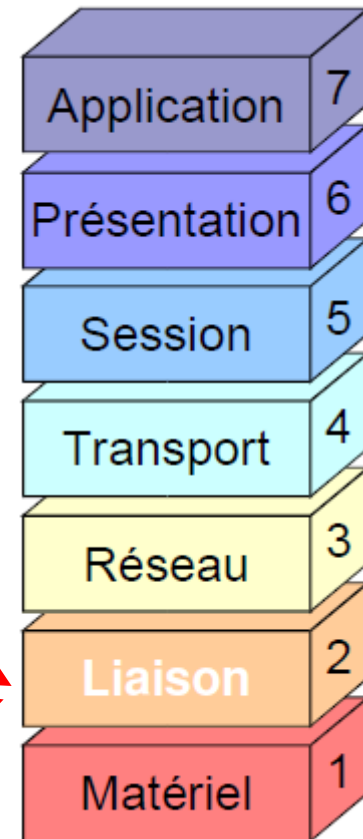
Questions de normalisation OSI

Couche 2 : Liaison

Comment identifier deux stations sur le même support physique?

Comment transmettre sans erreur les données d'une station à une autre sur le même support physique ?

Ex : Ethernet, Token Ring



Questions de normalisation OSI

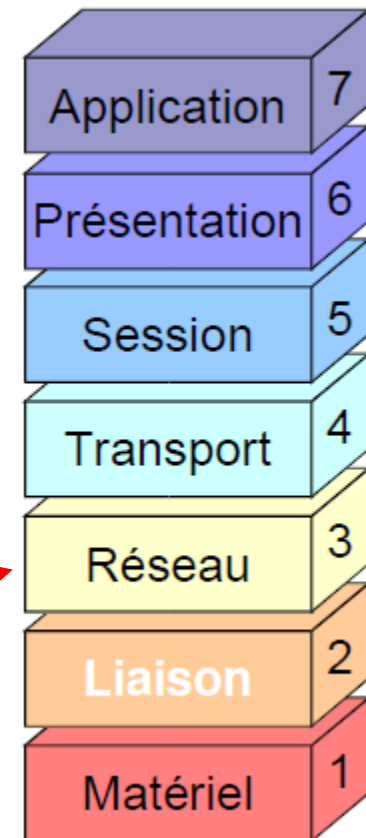
Couche 3 : Réseau

Comment acheminer un paquet entre 2 stations qui ne sont pas sur le même support physique (routage) ?

Comment assurer l'interconnexion de réseaux hétérogènes ?

Comment contrôler et réguler le trafic sur le réseau ?

Ex : IP



Questions de normalisation OSI

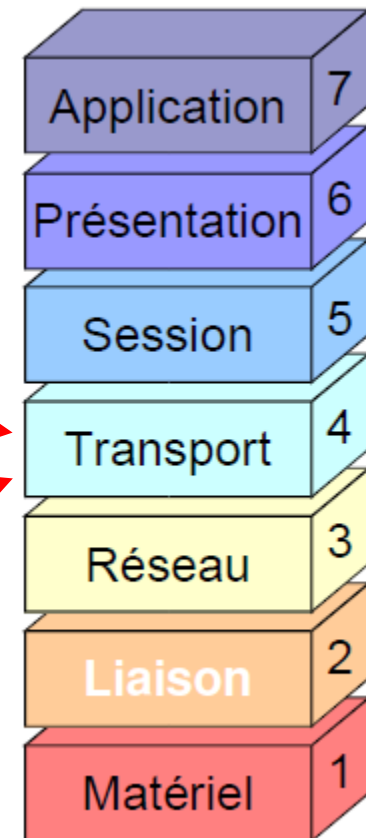
Couche 4 : Transport

Comment découper les messages en paquets ?

Comment s'assurer de leur bonne réception ?

Comment reconstituer le message à partir des paquets ?

Ex : TCP, UDP



Questions de normalisation OSI

Couche 1 : Matériel

caractéristiques du support physique pour le réseau :

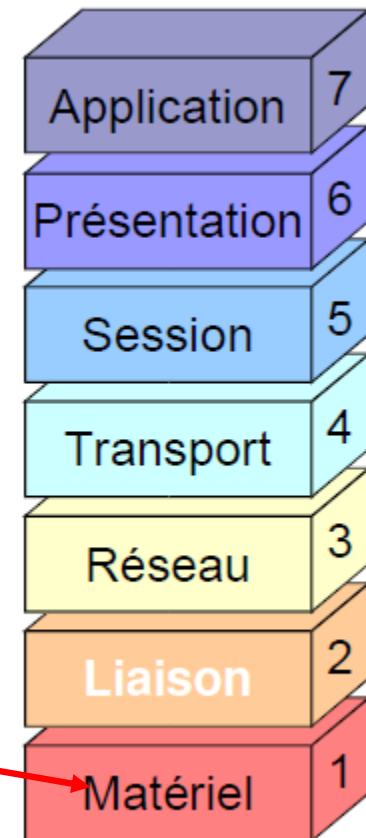
Pour du câble : type, blindage, type de signal, nature des signaux, Limitations

Communications hertziennes : fréquences, type de modulation,

Fibre optique : couleur du laser, section du câble, nombre de brins

Topologie du réseau :

Cablage en maille, bus, anneau, étoile, etc



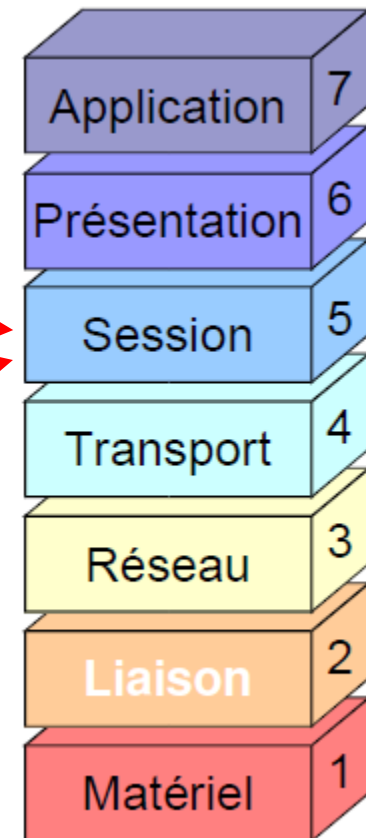
Questions de normalisation OSI

Couche 5 : Session

Comment établir une session entre deux utilisateurs distants ?

Comment gérer les problèmes de synchronisation ?

Ex : RPC



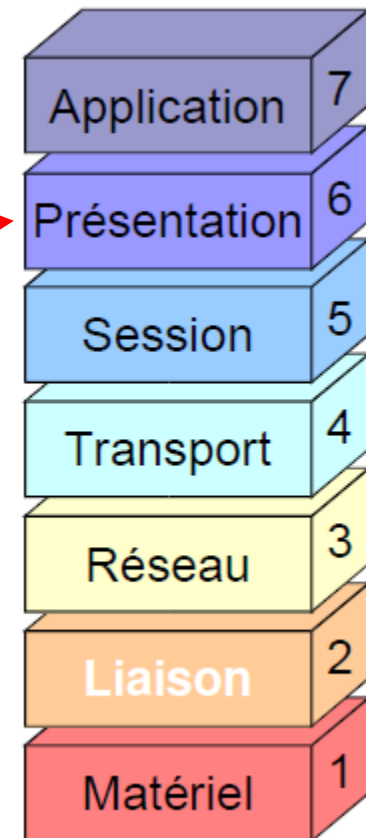
Questions de normalisation OSI

Couche 6 : Présentation

Quelle est la forme de l'information transmise ?

Comment les données sont-elles codées ?

Doit-on compresser ou crypter les données ?



Questions de normalisation OSI

Couche 7 : Application

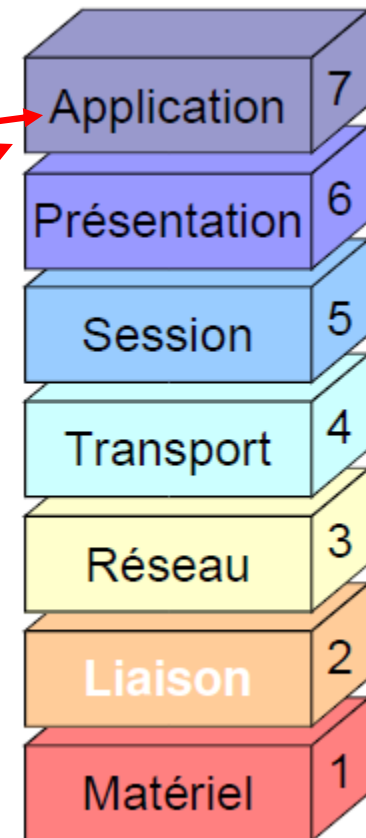
Quels sont les protocoles spécifiques aux programmes applicatifs ?
Doit-on compresser ou crypter les données ?

Ex :

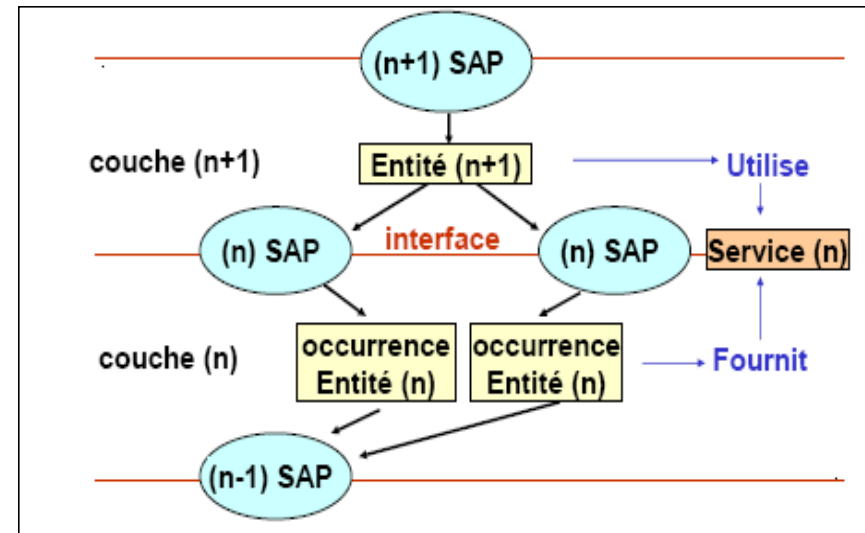
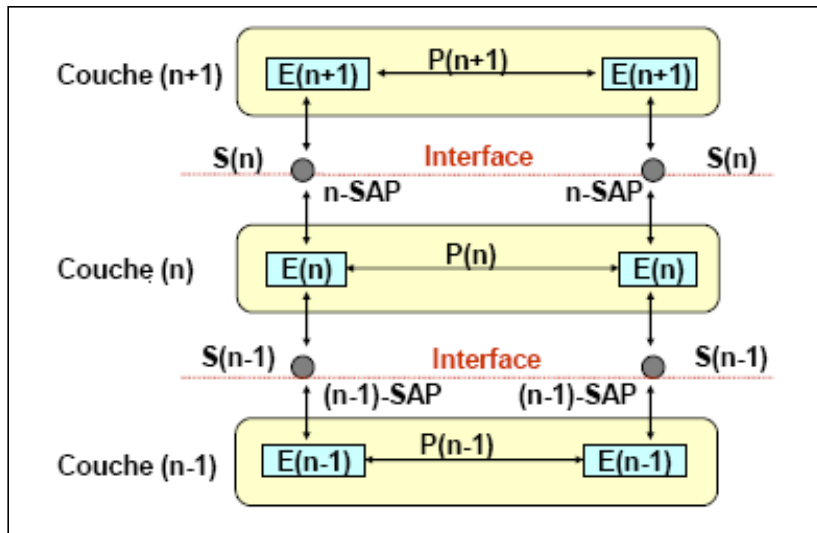
Ftp : transferts de fichiers

Http : transferts de pages web

SMTP,...



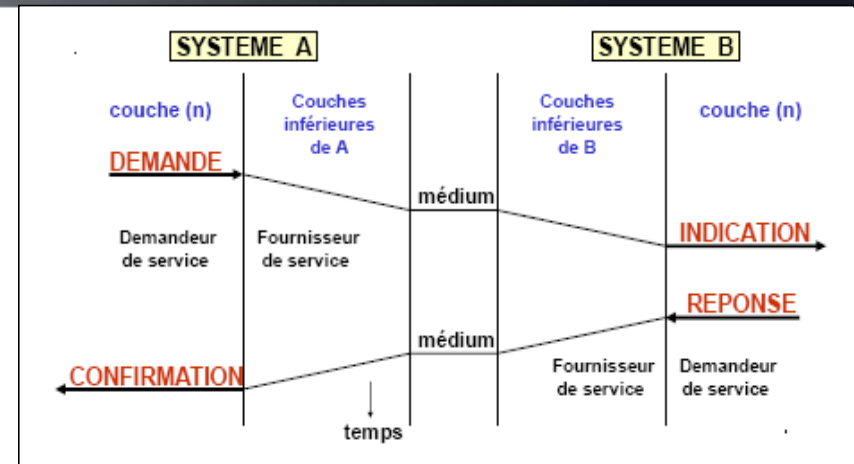
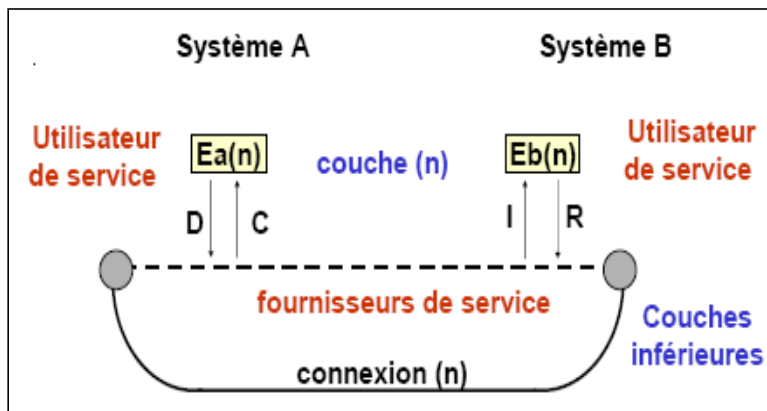
Organisation du dialogue entre les couches



Organisation du dialogue entre les couches

- Service N. Désigne le service qui doit être rendu par la couche N de l'architecture à la couche supérieure ($N + 1$). Ce service correspond à un ensemble d'actions devant être effectuées par cette couche, incluant événements et primitives, pour rendre ce service au niveau supérieur.
- Protocole N. Désigne l'ensemble des règles nécessaires à la réalisation du service N. Ces règles définissent les mécanismes permettant de transporter les informations d'un même service N d'une couche N à une autre couche N. En particulier, le protocole N propose les règles de contrôle de l'envoi des données.
- Points d'accès au service N, ou N-SAP (Service Access Point). quand une entité (n) fournit un service à une entité (n+1), les paramètres descriptifs du service sont échangés à travers une connexion par des points d'accès au service (n), appelés (n)-SAP, situés à la frontière entre la couche (n) et la couche (n+1), et repérés par des adresses.

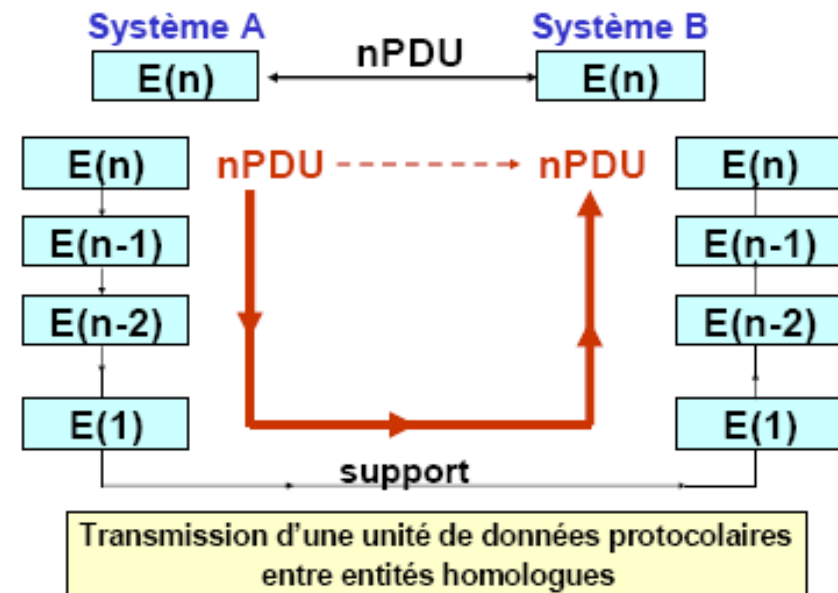
La mise en oeuvre des services



- Quatre primitives de service sont définies pour permettre à un utilisateur de service de s'adresser à une entité ou à une entité de répondre à un utilisateur de service
 - Les primitives de demande, par lesquelles un utilisateur de service appelle une procédure.
 - Les primitives d'indication, par lesquelles l'entité destinataire est avertie qu'une procédure a été mise en route par l'entité émettrice sur son point d'accès au service ou que le fournisseur de service indique qu'il appelle une procédure.
 - Les primitives de réponse, par lesquelles l'utilisateur distant du service N accepte ou refuse le service demandé.
 - Les primitives de confirmation, qui indiquent l'acceptation ou le refus du service demandé qui a été fait au point d'accès au service N.

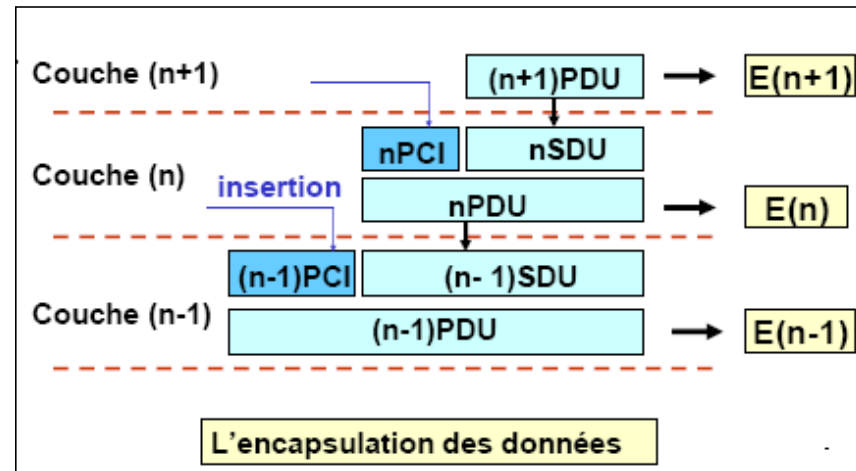
Les unités de données

- Les entités homologues de la couche (n) échangent des informations appelées Unités de Données Protocolaires, notées nPDU, suivant un protocole P(n).
- Ce transfert horizontal est logique, puisqu'il n'y a pas de lien physique entre les entités distantes de même niveau.
- Pour que la nPDU issue de l'entité E(n) du système A soit effectivement transférée vers son entité homologue du système B, il faut la faire descendre verticalement d'entité en entité du système A, jusqu'au support (seul moyen physique de transmission), puis la propager jusqu'à l'autre extrémité du support, et enfin la faire remonter jusqu'à l'entité distante E(n) du système B.



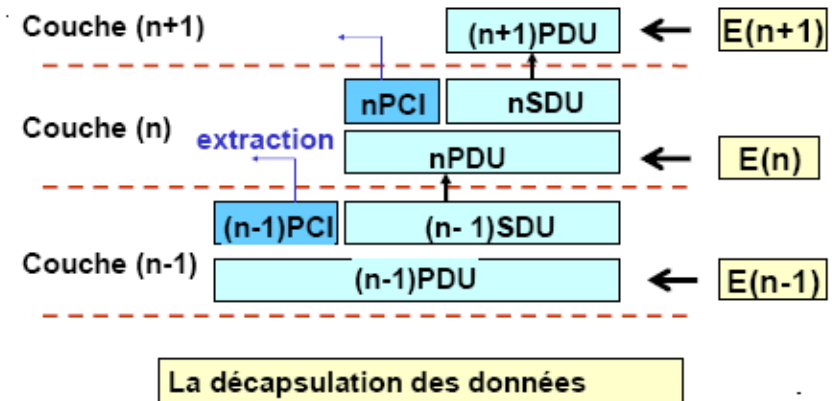
Les unités de données

- Quand l'entité $E(n+1)$ demande un service à l'entité $E(n)$, elle lui transmet une $(n+1)$ PDU en exécutant une procédure de service. L'entité $E(n)$ la reçoit comme une Unité de Données de Service notée n SDU (utilisatrice de service N). Il s'agit bien de la même unité de données qui est perçue par l'entité $E(n+1)$ comme une unité protocolaire, et par l'entité $E(n)$ comme une unité de service.
- L'entité $E(n)$ génère ensuite des Informations de Contrôle de Protocole, conformes au protocole $P(n)$, notées n PCI, à l'intention des autres entités du niveau (n) (ajout des informations nécessaires à la couche homologue (n) pour que celle-ci traite et délivre correctement les données à sa couche $(n+1)$). L'ensemble $\{n$ PCI: protocol control Information, n SDU $\}$ constitue la n PDU. Ainsi, dans le sens descendant, nous avons une encapsulation des données :
- Ce principe récurrent est répété entre le niveau (n) et le niveau $(n-1)$, et ainsi de suite, jusqu'au niveau 1.

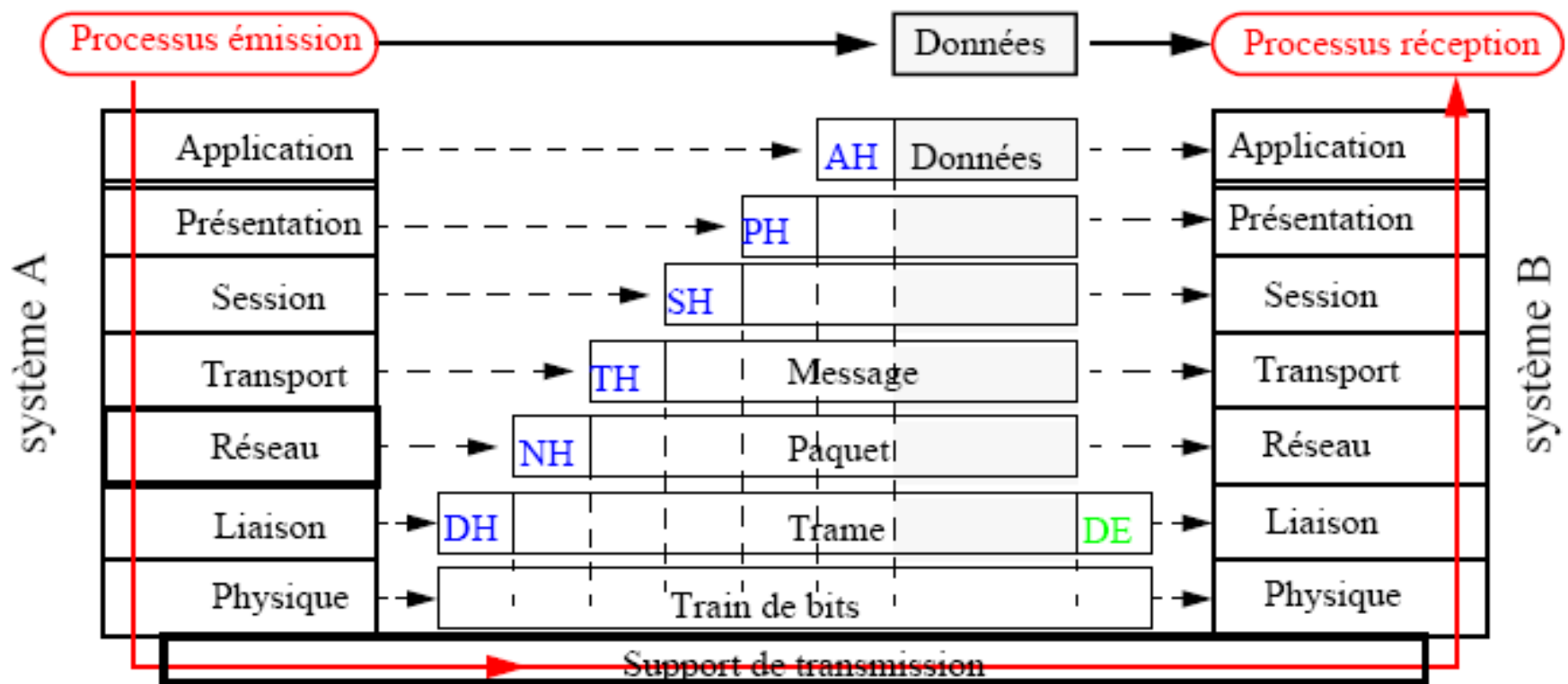


Les unités de données

- Dans le sens ascendant, nous avons, au contraire une décapsulation des données:
- Quand l'entité $E(n-1)$ fournit un service à l'entité $E(n)$, elle lui transmet une $(n-1)$ SDU par une procédure de service. L'entité $E(n)$ la reçoit comme une Unité de Données Protocolaire nPDU.
- Ensuite, l'entité $E(n)$ analyse cette unité de données, d'où elle extrait les Informations de Contrôle de Protocole nPCI, conformes au protocole $p(n)$ et placé à son intention par l'entité homologue de l'autre système. Elle utilise ces informations, puis les supprime. L'information restante constitue, pour elle, une unité de données de service nSDU, qu'elle transmet à son tour par une procédure de service à l'entité de niveau $(n+1)$.
- Ce principe récurrent est répété entre le niveau (n) et le niveau $(n+1)$, et ainsi de suite, depuis le niveau 1.

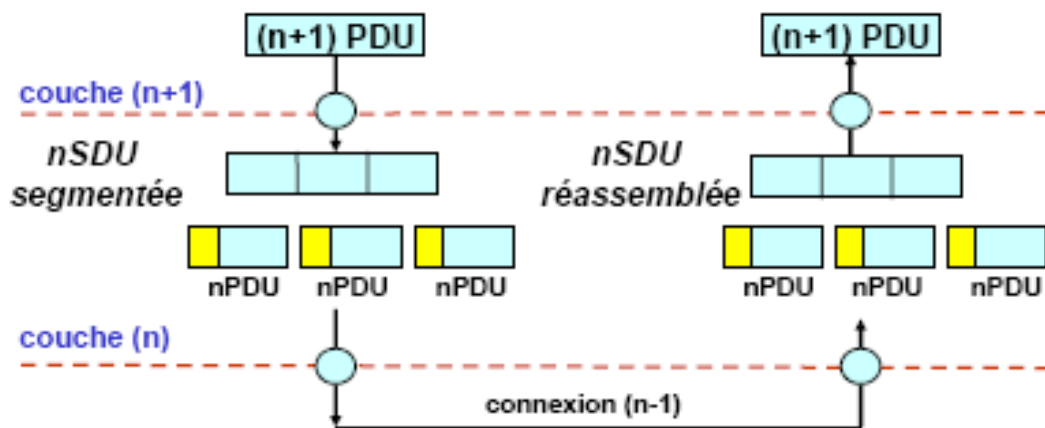


L'encapsulation des données dans le modèle OSI



Les techniques d'adaptation de la taille des données

- Les unités de données, manipulées par les différentes couches ou par le système intermédiaire ne sont pas forcément de taille compatible avec les capacités de ces systèmes. Différents mécanismes peuvent alors être utilisés.



La segmentation et le réassemblage

Interconnexion de réseaux

- Plusieurs petits réseaux
- Supports différents:
 - Ethernet, lignes spécialisées, RTC, ATM, Frame Relay, FDDI
 - Chaque support à ses propres règles d'adressages et ses protocoles
 - Comment les relier entre eux et fournir une vue unifiée du tout ?

Unification par la couche réseau

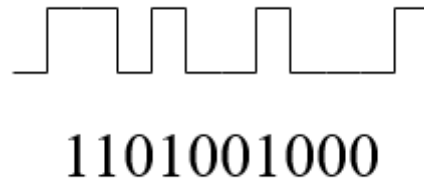
- Définir un protocole qui fonctionne de la même manière quel que soit le support sous-jacent
 - Appelons celle-ci la couche réseau
- Les routeurs IP fonctionnent dans la couche réseau
- Des méthodes sont définies pour utiliser:
 - IP sur Ethernet
 - IP sur ATM
 - IP sur FDDI
 - IP sur ligne série (PPP)
 - IP au dessus de tout... (RFC 1149)

Trame, Datagramme, Segment, Paquet

- Différents noms pour les paquets à différents niveaux
 - Ethernet (lien physique): trame
 - IP (couche réseau): datagramme
 - TCP (transport): segment
- La terminologie n'est pas strictement respectée
- On utilise souvent le terme "paquet" à tous les niveaux

Couche 1: couche physique

- Transmets des bits en utilisant du courant électrique, lumière, ondes radio, etc...
- Pas de concept d'octets ou de trames.
- Les bits sont définis par des niveaux de tension, ou autre propriété physique similaire:



Couche 2: données

- Regroupe les bits en trames, achemine les trames entre les stations sur un même lien
- Une trame a un début, une fin et une taille
 - utilisation de certaines valeurs pour délimiter début/fin
- Dispose souvent d'une adresse source et destination sur le lien (ex: adresse MAC Ethernet)
- Certains types de liens détectent les trames corrompues
- Certains types de liens relayent les trames corrompues (pas Ethernet)

Couche 3: réseau

- Un espace d'adressage pour tout le réseau d'interconnexion
- Mode sans connexion
- Ajoute une couche d'adressage supplémentaire
 - ex: adresse IP != adresse MAC
 - nous avons donc besoin d'un mécanisme de correspondance entre adresses de niveau différents
- Non fiable (meilleur effort)
 - si les paquets sont perdus, la couche réseau ne s'en soucie pas
 - c'est le rôle des couches supérieures de retransmettre les paquets perdus

robuste mais pas fiable

Couche 3: réseau

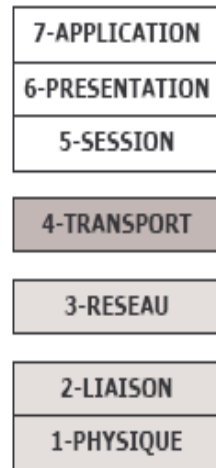
- Retransmet les paquets saut par saut (hop by hop forwarding)
 - les paquets de la couche réseau sont encapsulés dans une trame de la couche données
 - différentes formes d'encapsulation sur différents type de liens
 - possibilité d'envoyer sur un lien, retransmettre sur un autre
 - Il peut y avoir de nombreux sauts entre la source et la destination

- Prend des décisions de routage
 - comment envoyer un paquet plus près de sa destination finale ?
 - les tables de routage et de retransmission représentent la "connaissance" de la topologie du réseau
 - les routeurs peuvent discuter entre eux pour échanger des informations sur la topologie du réseau

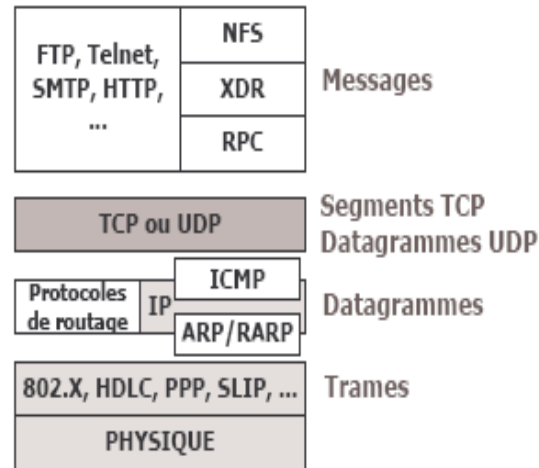
Réseaux Internet

- Les réseaux Internet sont un cas particulier des réseaux IP
- Pile protocolaire TCP/IP
- On notera que l'appellation TCP/IP provient du protocole **orienté connexion** de la couche transport (TCP) et de celui de la couche réseau (IP).

Architecture OSI



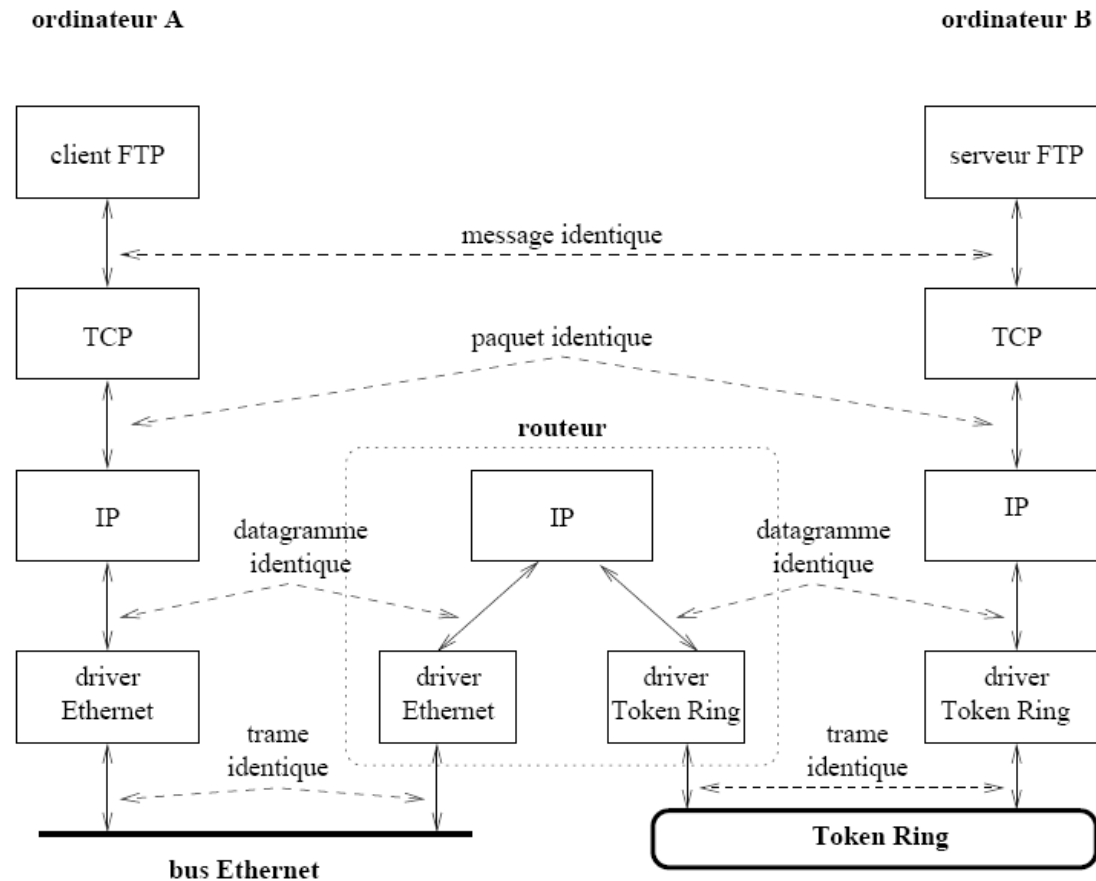
Architecture TCP/IP



Couche 4 : TCP

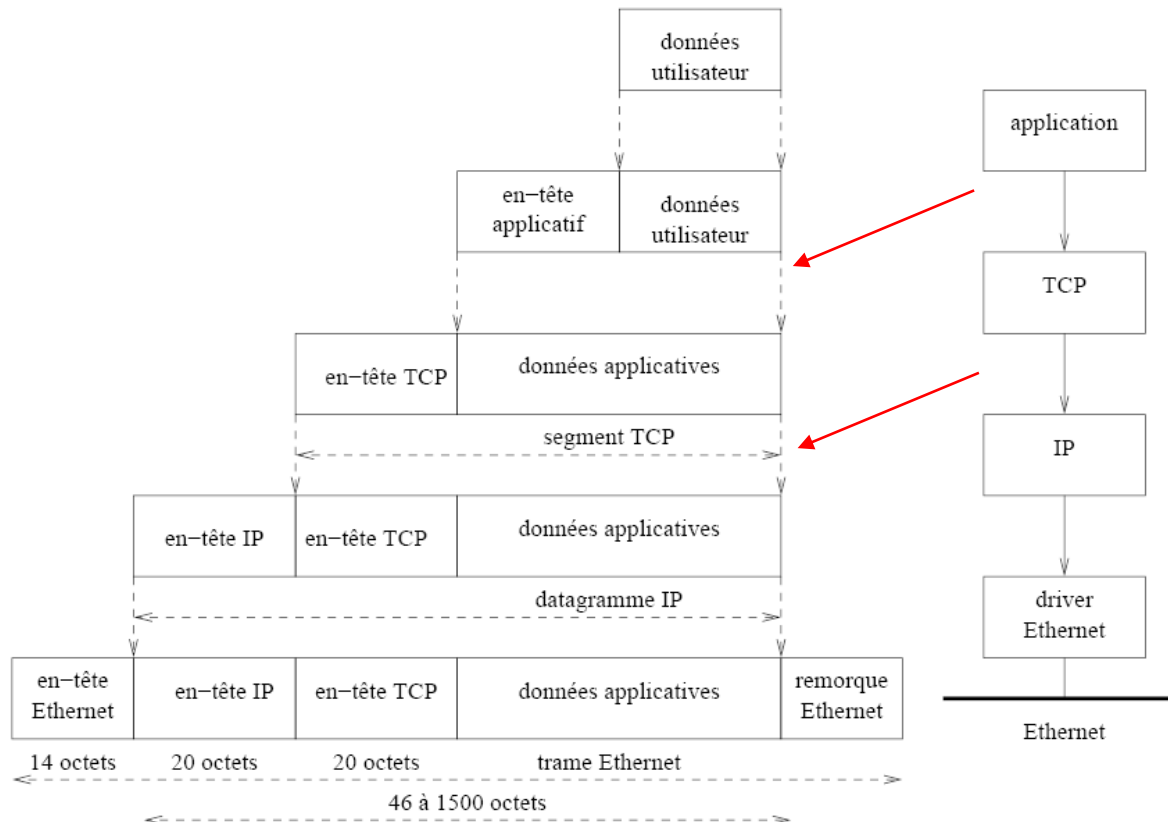
- Correspond à la couche transport du modèle OSI : permettre à des entités paires de soutenir une conversation.
- TCP est un protocole fiable, orienté connexion, qui permet l'acheminement sans erreur de paquets issus d'une machine terminale à une autre machine terminale.
- Son rôle est de fragmenter le message à transmettre de manière à pouvoir le faire passer sur la couche réseau. A l'inverse, sur la machine destination, TCP replace dans l'ordre les fragments transmis sur la couche réseau pour reconstruire le message initial. TCP s'occupe également du contrôle de flux de la connexion.
- Grâce au système d'accusés de réception du protocole TCP, les applications peuvent communiquer de façon sûre, indépendamment des couches inférieures

Communication entre réseaux IP



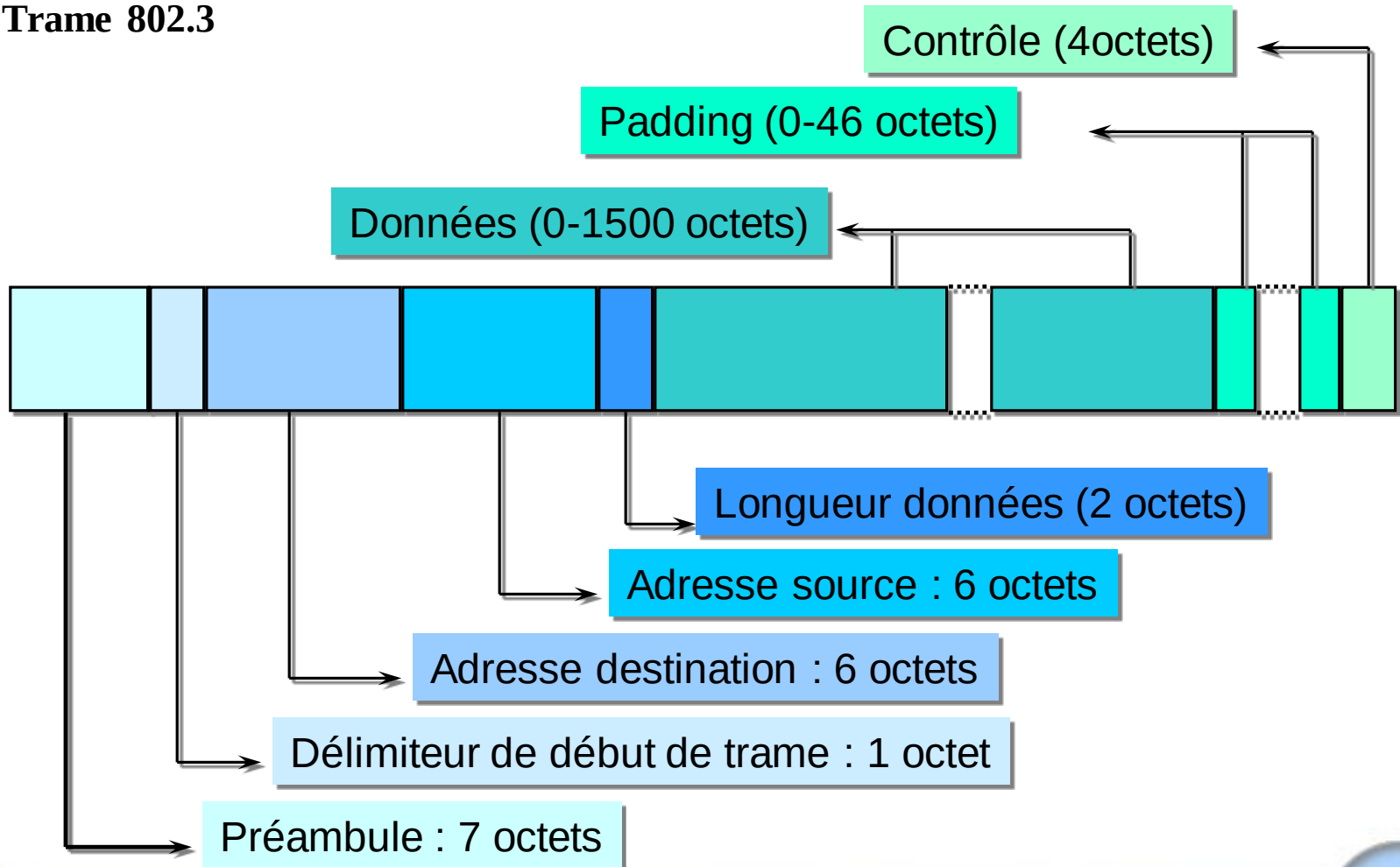
Encapsulation de données TCP/IP

- Les couches inférieures ajoutent des en-têtes (et quelquefois des suffixes) aux données des couches supérieures



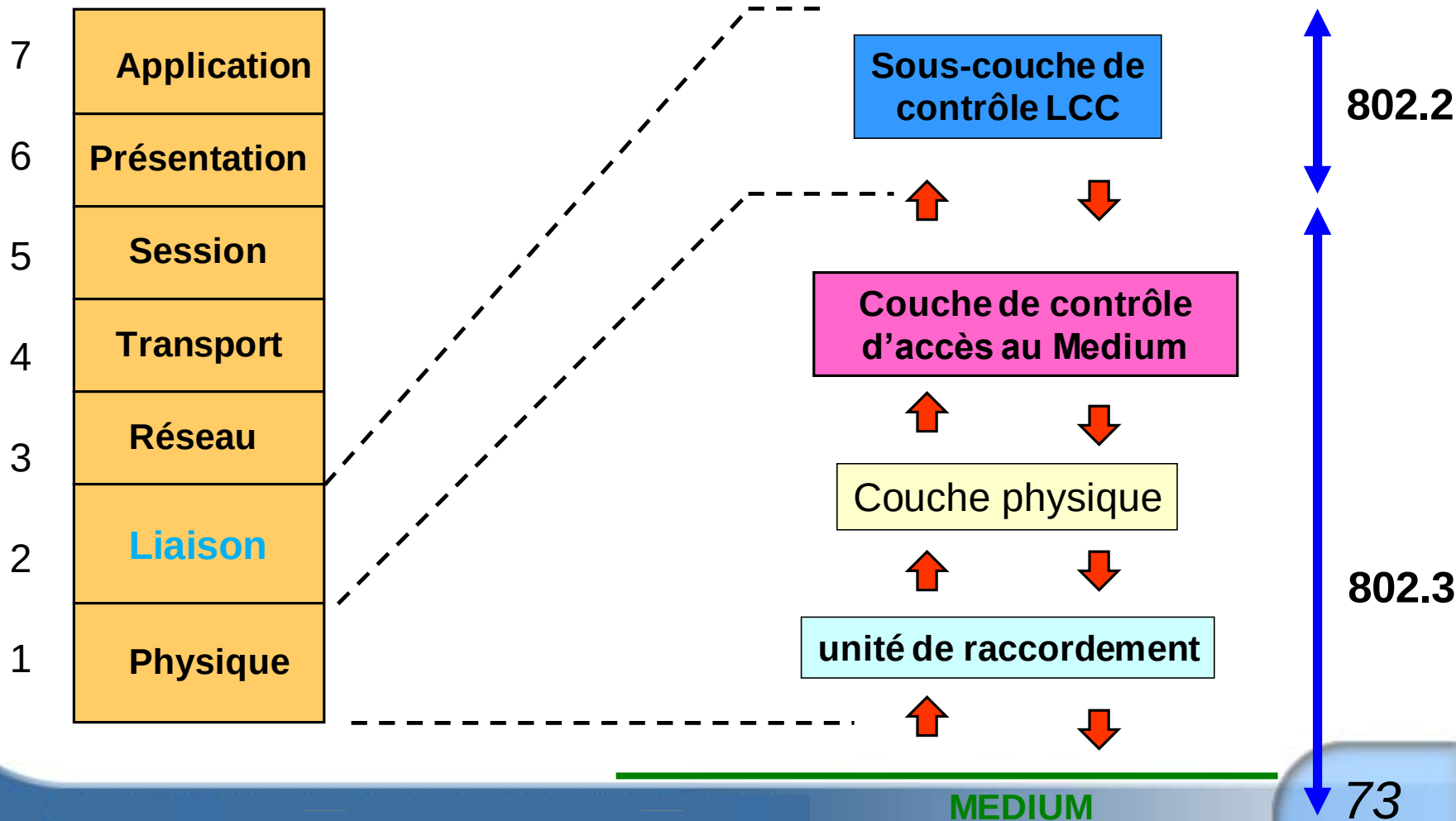
Trame Ethernet

- Trame 802.3



Trame Ethernet

Modèle ISO 7 couches



Trame Ethernet

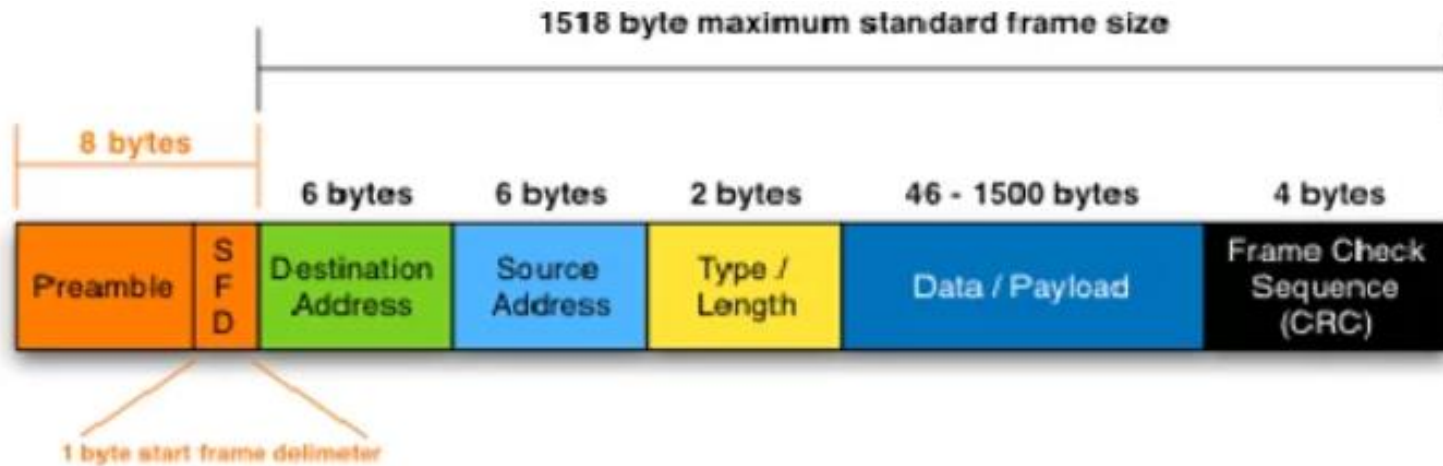
- **Trame 802.3**
- **Préambule** : 56 bits = 7 X (1010101010), dure 5.6 s et permet aux autres stations d'acquérir la synchronisation bit.
- **Délimiteur de début de trame** (Start Frame Delimiter) : 8 bits = 10101011; permet aux autres stations d'acquérir la synchronisation caractère et la synchronisation trame.
- **Adresse destination** : adresse individuelle, pouvant être de classe "administrée localement" ou "globalement", adresse multicast, adresse broadcast.
- **Adresse source** : adresse physique de la station émettrice, c'est une adresse individuelle pouvant être de classe "administrée localement" ou "administrée globalement".

Trame Ethernet

- **Longueur du champ de données** : valeur comprise entre 1 et 1500, indique le nombre d'octets contenus dans le champ suivant; si la valeur est supérieure à 1500, la trame peut être utilisée à d'autres fins (autre protocole que IEEE 802.3, permet la compatibilité avec ethernet)
- **Padding** : contenu sans signification complétant à 64 octets la taille totale d'une trame dont la longueur des données est inférieure à 46 octets; en effet, une trame est considérée valide (non percutée par une collision) si sa longueur est d'au moins 64 octets; $46 \leq (\text{données} + \text{padding}) \leq 1500$.
- **Contrôle** : séquence de contrôle basée sur un CRC polynomial de degré 32.
- Sens de circulation des octets : selon la structure logique de la trame : préambule = premier octet émis, FCS = dernier octet émis.
- Le sens de circulation des bits par octets se fait selon le schéma suivant : LSB first

Trame Ethernet

- Une trame **Ethernet** est identique à la trame 802.3 sauf le champ type indiquant le type de protocole véhiculé dans le trame
- Champ de 2 octets représenté sous la forme hexadécimale XX-YY ou XXY Y.
- Les valeurs connues sont :
 - 0806 : ARP, 0800 : IP

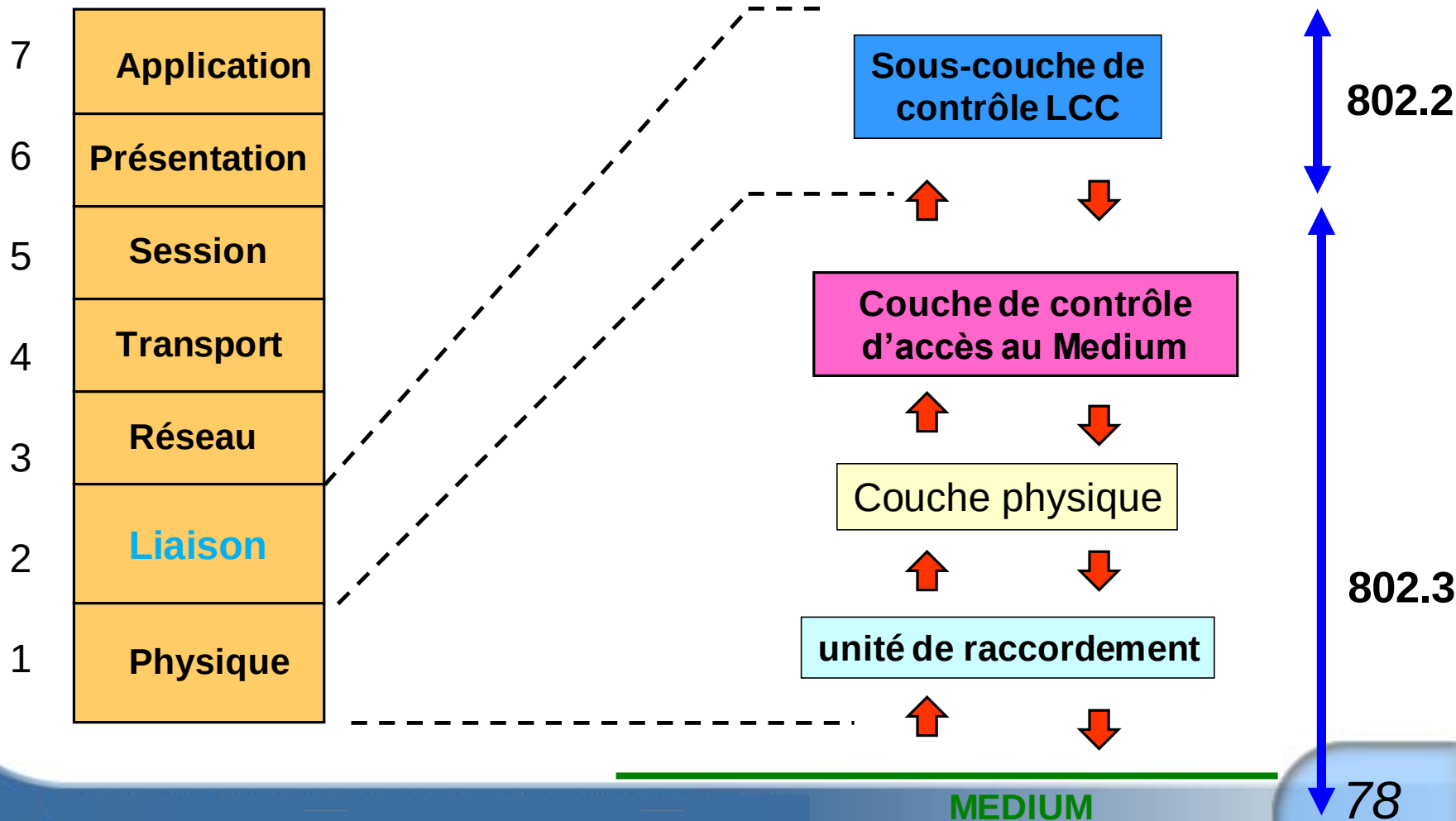


Trame Ethernet

- 46 octets de données minimum
 - 64 octets/trame (+ préambule + SFD)
 - 51,2µs minimum ('slot time'): Fast Ethernet
 - Longueur maximale = 2,5 km
- 96 bits inter-trame
 - 0,96µs de 'blanc' entre deux trames : Fast Ethernet
- Les adresses IEEE 802.3 ou Ethernet sont codées sur 48 bits (6 octets).
 - **syntaxe :**
 - 08:00:20:09:E3:D8 ou 8:0:20:9:E3:D8 ou 08-00-20-09-E3-D8 ou 08002009E3D8
 - **Adresse Broadcast**
 - FF:FF:FF:FF:FF:FF

Trame Ethernet

- La sous-couche MAC



Trame Ethernet

- **La sous-couche MAC**
- Elle met en œuvre le protocole CSMA/CD : elle est chargée de mettre en forme les trames de données avec détection des erreurs de transmission et de gérer la liaison canal en écoutant les signaux "Carrier Sense" et "Collision Detection" émis par la couche physique

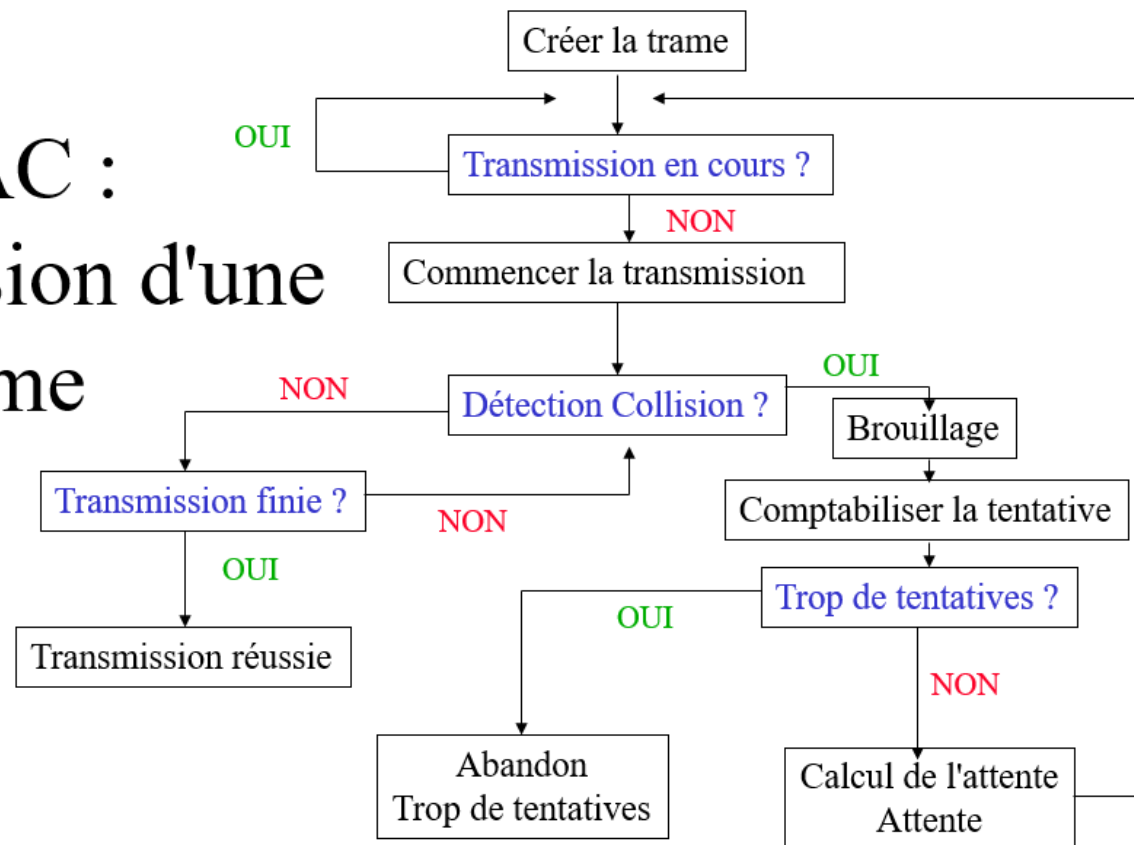
La couche **MAC** reçoit de la couche **LLC** des données à émettre. Son rôle consiste à

- ajouter préambule et SFD aux données de la couche LLC,
- ajouter le padding si nécessaire,
- ajouter les champs adresse source, adresse destinataire, longueur des données,
- calculer le CRC et l'ajouter à la trame,
- si le signal "Carrier Sense" est faux depuis au moins 9.6μs (espace inter-trame à respecter), transmettre la trame bit à bit à la couche physique,
- sinon attendre que le signal "Carrier Sense" soit faux, attendre 9.6 μs et transmettre bit à bit à la couche physique.

Trame Ethernet

- La sous-couche MAC

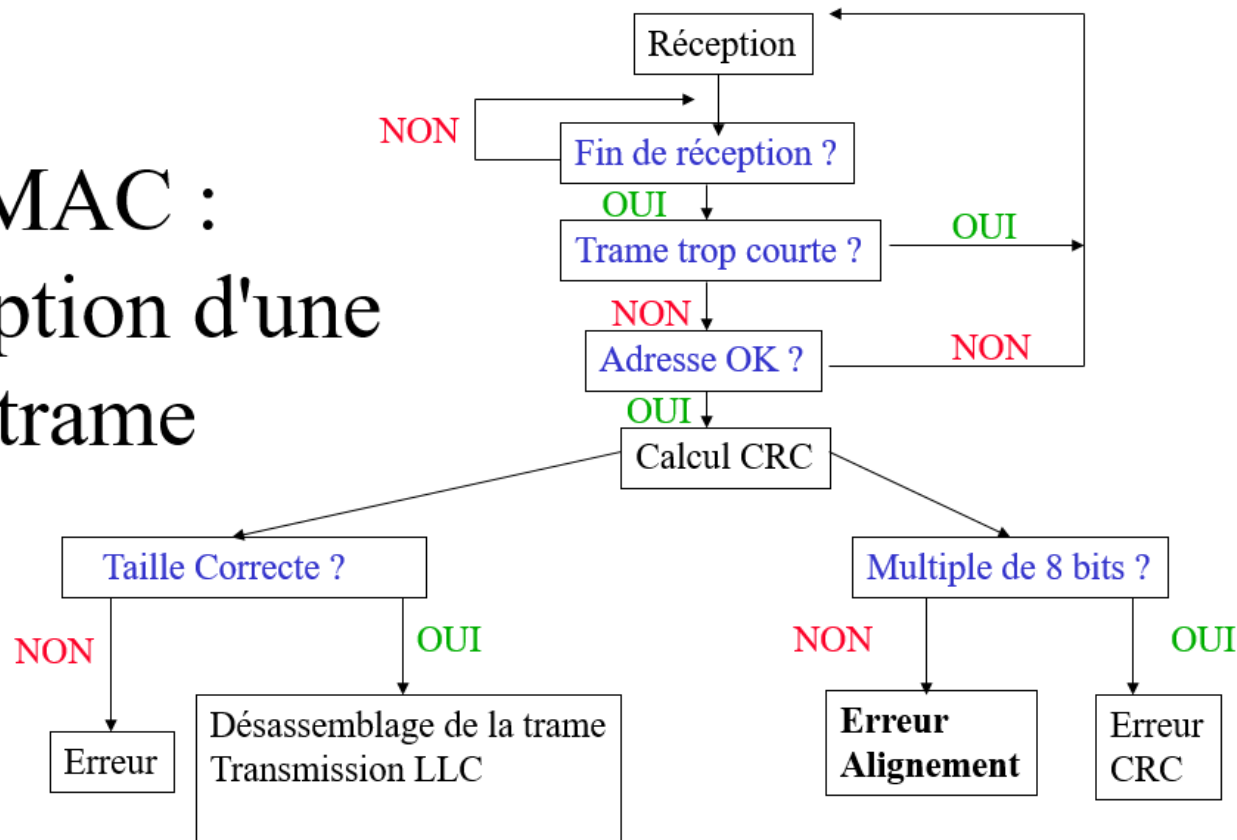
MAC : Transmission d'une trame



Trame Ethernet

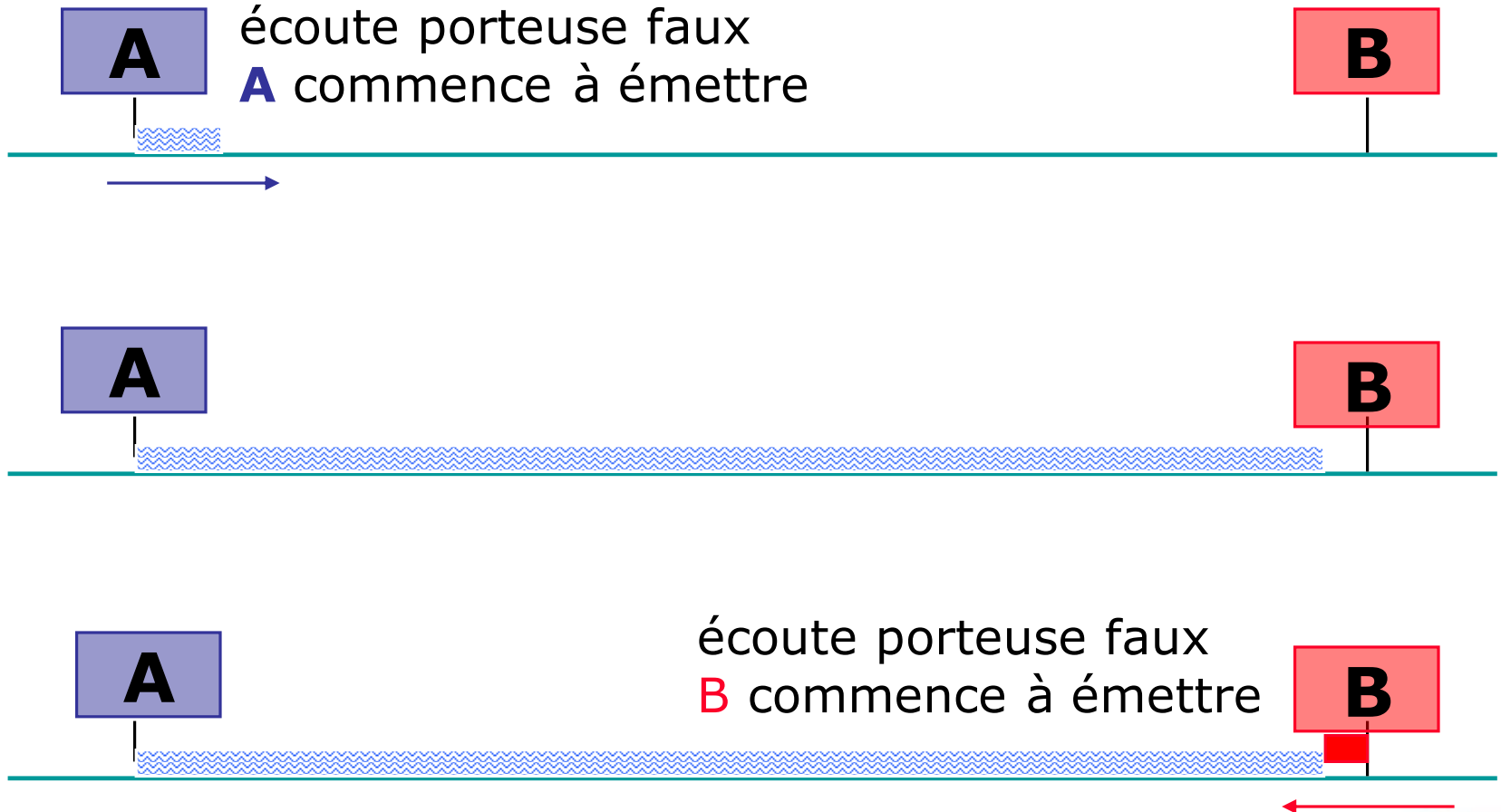
- La sous-couche MAC

MAC :
Réception d'une
trame



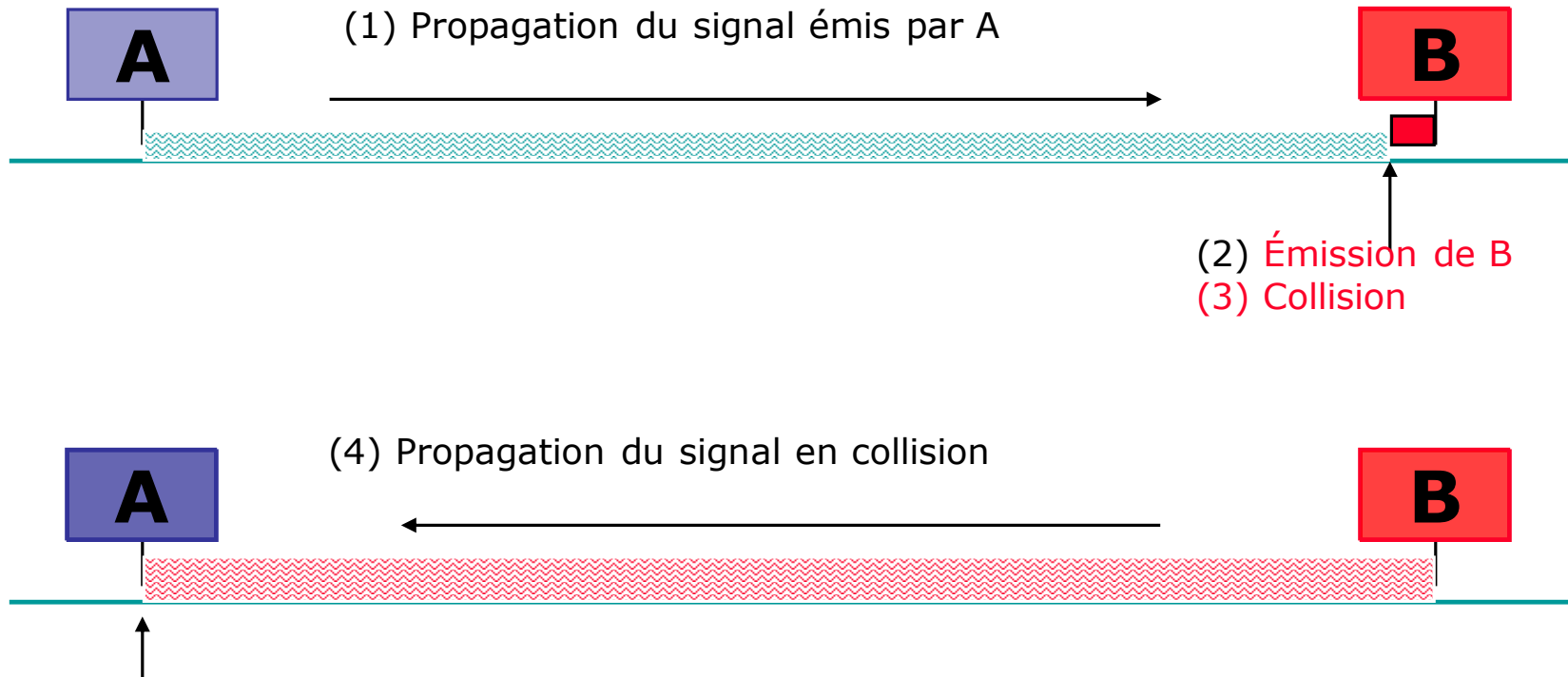
Trame Ethernet

- Collision



Trame Ethernet

▪ Collision



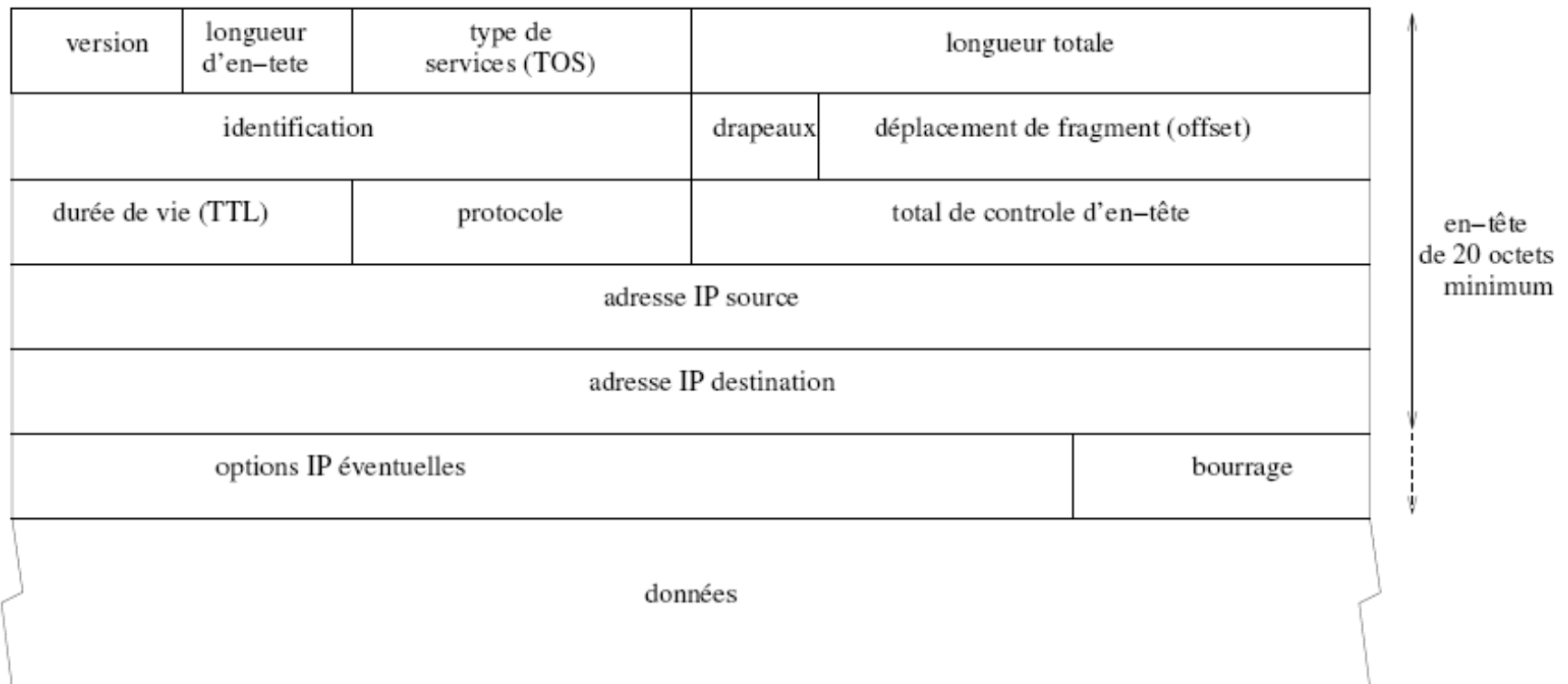
(5) Réception du signal en collision par A

(6) Arrêt d'émission de A

Temps maximum écoulé = Aller + Retour $\approx 50 \mu s \approx$ temps d'émission de 63 octets

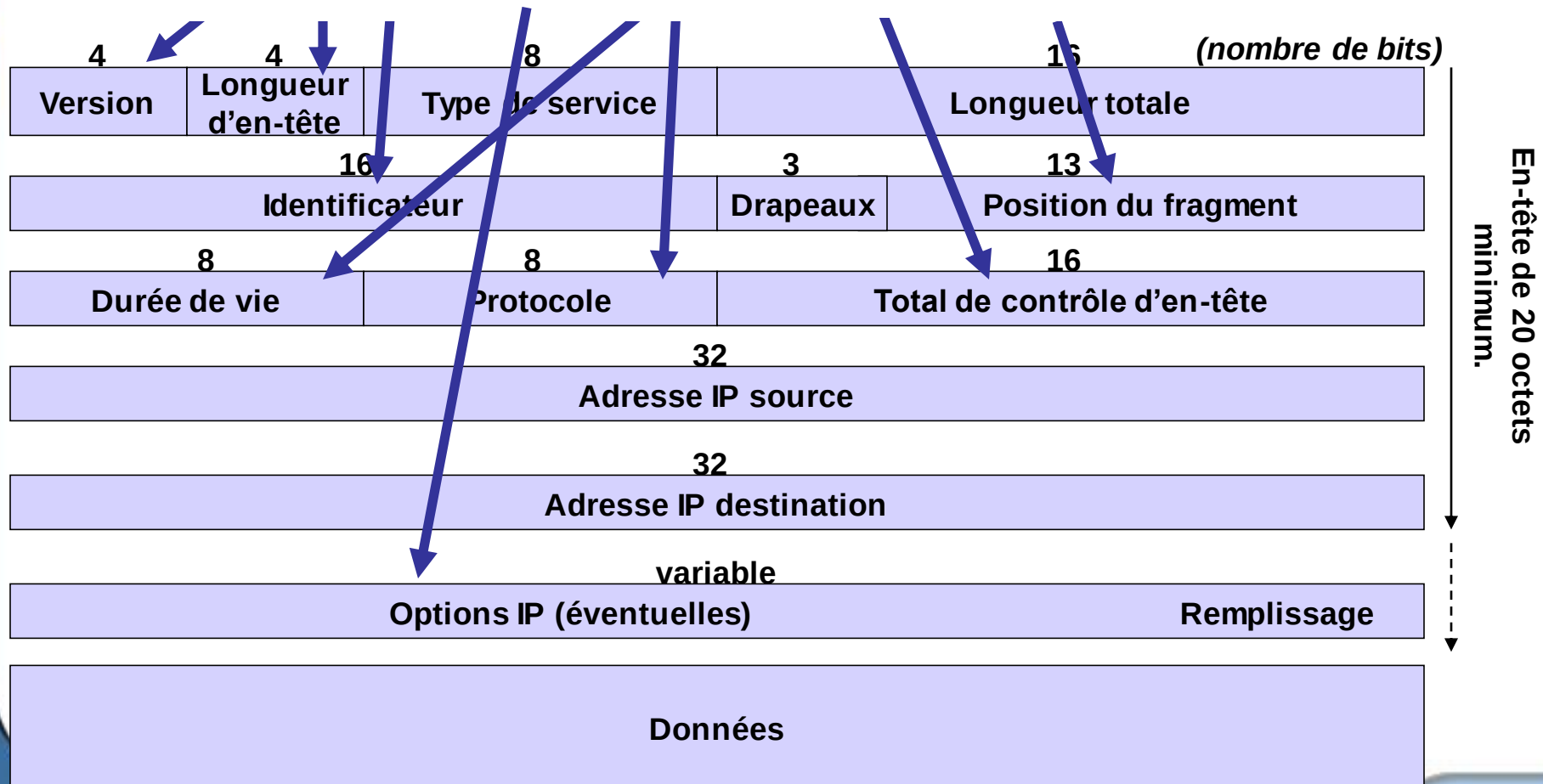
Paquet IP

- Format



Paquet

-contrôle ou mise au point (routage prédéterminé, enregistrement de la route, ...). < 40 octets.



Paquet IP

- Chaque machine susceptible d'être connectée à l'extérieur de son réseau local possède une adresse IP en principe unique.
- Identification unique.
- Les adresses codées sur 32 bits comportent deux parties :
 - le numéro de réseau (net_id)
 - le numéro de la machine sur le réseau (host_id)

Représentation décimale

133	27	162	125
-----	----	-----	-----

Représentation binaire

10000101	00011011	10100010	01111101
----------	----------	----------	----------

Paquet IP

- Structure de base d'une adresse IP

0		7	24	
	net_id (adresse réseau)		host_id (adresse station)	Classe A
10		14	16	
	net_id		host_id	Classe B
110		21	8	
	net_id		host_id	Classe C
1110		28		
	Adresse de Multicast			Classe D
11110		27		
	Format non défini			Classe E

Adressage Internet

Paquet IP

- Les classes d'adresse correspondent à des réseaux de plus ou moins grande envergure avec des plages d'adresses successives.

Classe	Adresses de réseau	Nombre de réseaux	Nombre de machines
A	1.0.0.0 à 126.0.0.0	126	16 777 214
B	128.0.0.0 à 191.255.0.0	16382	65 534
C	192.0.0.0 à 223.255.255.0	2 097 150	254

Classe	Adresses de réseau	Nombre d'adresses de groupes
D	224.0.0.0 à 239.255.255.0	268 435 455
E	240.0.0.0 à 247.255.255.255	

Paquet IP

- La classe D est réservée pour le multicast : l'envoi d'un paquet à un groupe limité de machines sur un réseau.
 - Remarque : Une machine faisant partie d'un groupe de multicast a 2 adresses IP : une @ individuelle et une @ de groupe.
- Les autres adresses sont particulières ou réservées :
 - 0.0.0.0 : adresse non encore connue, utilisée par une machine pour connaître sa propre adresse IP au démarrage.
 - (net_id, host_id=0) : désigne le réseau (ou sous-réseau) lui-même.
 - Exemple : réseau de l'IUT = 193.55.44.0
 - (net_id, host_id dont tous ses bits sont à 1) : adresse de diffusion (*broadcast*), désigne toutes les machines du réseau concerné.
 - Exemple : @ de diffusion sur le réseau de l'IUT : 193.55.44.255

Paquet IP

- Les autres adresses sont particulières ou réservées :
 - 255.255.255.255 : adresse de diffusion (broadcast). Idem que précédent sauf que le numéro du réseau n'a pas besoin d'être connu
 - 127.X.Y.Z : adresse de bouclage (localhost, loopback), utilisée pour des communications inter-processus sur le même ordinateur ou des tests de logiciels (127.0.0.1 par exemple).
 - adresses utilisées pour constituer un réseau privé :

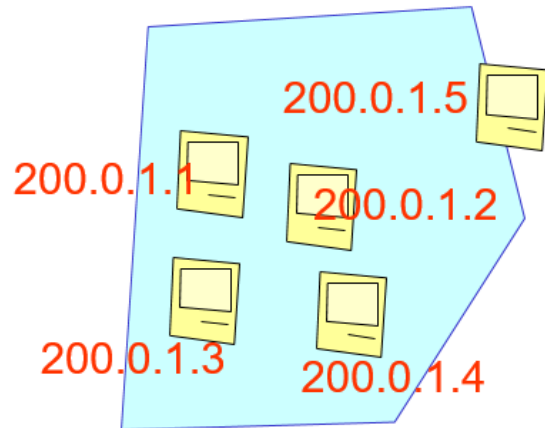
Classe A	Classe B	Classe C
10.0.0.0	172.16. 0.0 à 172.31.0.0	192.168.0.0 à 192.168.255.0

- Ces adresses ne sont pas routables sur Internet

Paquet IP

- Taille d'un réseau

Réseau : 200.0.1.0/24



Réseau de Classe C peut avoir au plus $2^8 - 2$ machines numérotées de 1 à 254

Adresse de **diffusion** dans le réseau 200.0.1.0/24:
200.0.1.255

Paquet IP

- Plage d'adresses

exemple :
129.175.13.0/24

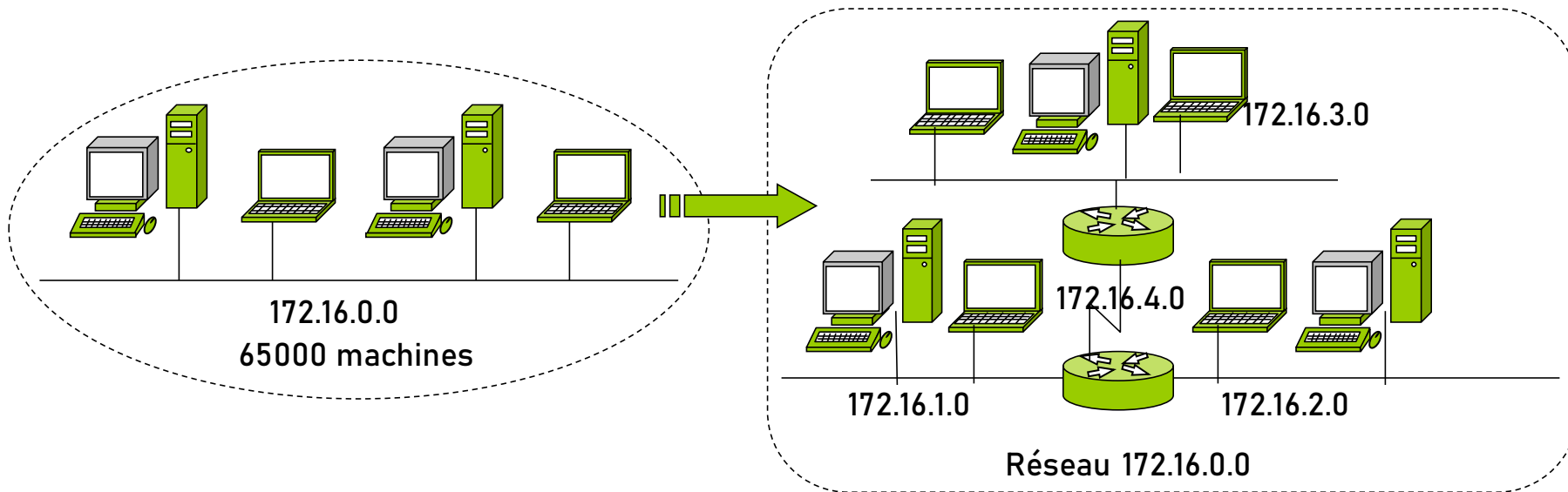
24	8	
10000001.10101111.00001101.00000001		} $2^8 - 2 = 254$ adresses IP dans cette plage
10000001.10101111.00001101.00000010		
...		
10000001.10101111.00001101.11111101		
10000001.10101111.00001101.11111110		

Paquet IP

- **Segmentation en sous-réseaux**
- Pourquoi segmenter le réseau en plusieurs sous-réseaux ?
 - réduire le nombre de communications sur un même segment
 - Ex. : Transmission sur un réseau Ethernet = diffusion ? encombrement du support (les stations non concernées par la trame ne peuvent émettre pendant sa diffusion) + peu sécurisé (confidentialité ? Toutes les stations voient passer toutes les trames...)
 - connecter des réseaux d'architectures hétérogènes
 - structurer la gestion des domaines ou sous-domaines

Paquet IP

- Segmentation en sous-réseaux



Adressage Internet

Paquet IP

- **Segmentation en sous-réseaux**
- Lorsqu'une segmentation en sous-réseaux est nécessaire, le `host_id` peut être découpé en deux parties :
 - une adresse de sous-réseau
 - une adresse de numéro de machine
- Un masque de sous réseau ou **netmask** a le même format qu'une adresse Internet. Les bits à 1 désignent la partie sous réseau de l'adresse et les bits à 0 la partie numérotation des machines sur le sous-réseau.

	Décimal	Binaire	
Adresse IP	192.44.77.79	1100 0000 . 0010 1100 . 0100 1101 . 0100 1111	
Netmask	255.255.255.192	1111 1111 . 1111 1111 . 1111 1111 . 1100 0000	

Adresse sous-réseau	192.44.77.64
1100 0000 . 0010 1100 . 0100 1101 . 0100 0000	

Adresse machine	15
00 1111	15

Paquet IP

- **Segmentation en sous-réseaux**
- Masques de sous-réseau par défaut pour les classes standards :
 - classe A : 255.0.0.0
 - classe B : 255.255.0.0
 - classe C : 255.255.255.0

Paquet IP

- **Principe du routage**
- Routage d'un paquet = trouver le chemin de la station destinatrice à partir de son adresse IP.
- Si le paquet émis par une machine ne trouve pas sa destination dans le réseau ou sous-réseau local, il doit être dirigé vers un routeur qui rapproche le paquet de son objectif (chaque routeur possède une adresse par interface réseau) .
- La machine source applique le masque de sous-réseau (netmask) pour savoir si le routage est nécessaire.
- Chaque routeur doit donc connaître l'adresse du routeur suivant, il doit gérer une table de routage de manière statique ou dynamique.

Paquet IP

Exemple de routage

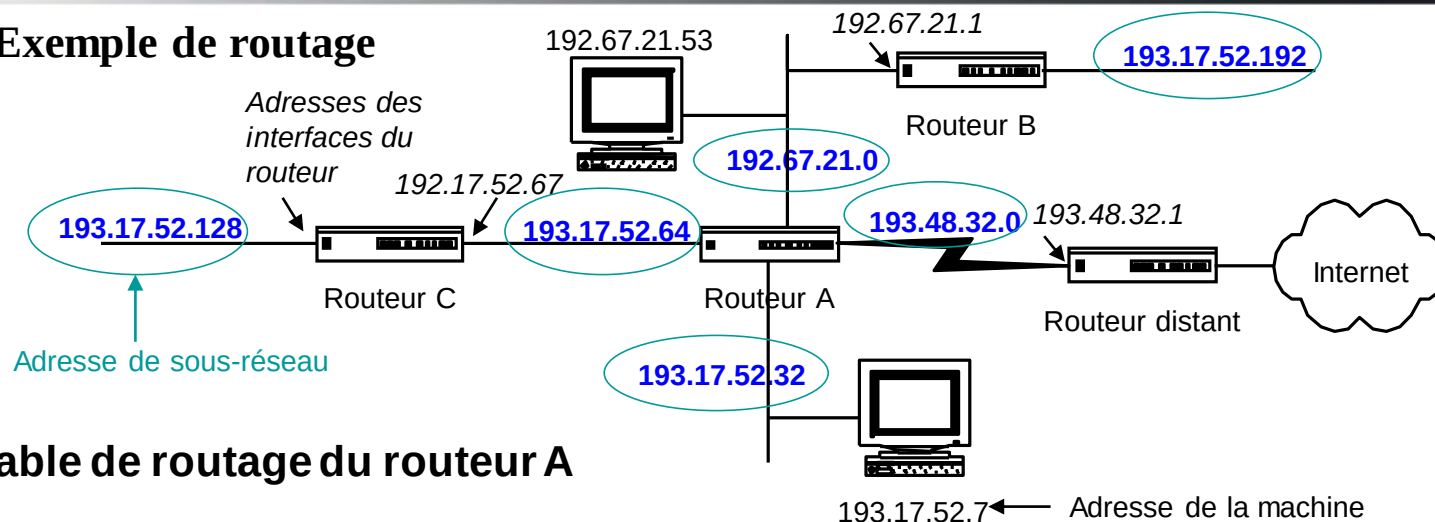


Table de routage du routeur A

Destination	Masque	Prochain routeur	Interface	Nb de sauts
192.67.21.0	255.255.255.0	Direct	Ethernet 1	1
193.48.32.0	255.255.255.0	Direct	Ethernet 2	1
193.17.52.32	255.255.255.224	Direct	Ethernet 3	1
193.17.52.64	255.255.255.224	Direct	Ethernet 4	1
193.17.52.128	255.255.255.224	192.17.52.67	Ethernet 4	2
193.17.52.192	255.255.255.224	193.67.21.1	Ethernet 1	2
0.0.0.0	0.0.0.0	193.48.32.1	Ethernet 2	

Paquet IP

- **Exemple de routage**
- La table de routage d'une machine fonctionnant sous Windows et possédant trois interfaces réseau est donnée ci-dessous.
- L'extérieur est joint par l'interface 195.132.60.41 via la passerelle 195.132.60.1.
- Les sous-réseaux privés 192.168.0.0 et 192.168.1.0 sont atteints respectivement par les interfaces 192.168.0.1 et 192.168.1.1.

```
C:\WINDOWS>route print
```

Itinéraires actifs :

Adresse réseau	Masque réseau	Adr. passerelle	Adr. interface	Métrique
0.0.0.0	0.0.0.0	195.132.60.1	195.132.60.41	1
192.168.0.0	255.255.255.0	192.168.0.1	192.168.0.1	1
192.168.0.255	255.255.255.255	192.168.0.1	192.168.0.1	1
192.168.1.0	255.255.255.0	192.168.1.1	192.168.1.1	1
192.168.1.255	255.255.255.255	192.168.1.1	192.168.1.1	1
195.132.60.0	255.255.255.0	195.132.60.41	195.132.60.41	1
195.132.60.255	255.255.255.255	195.132.60.41	195.132.60.41	1

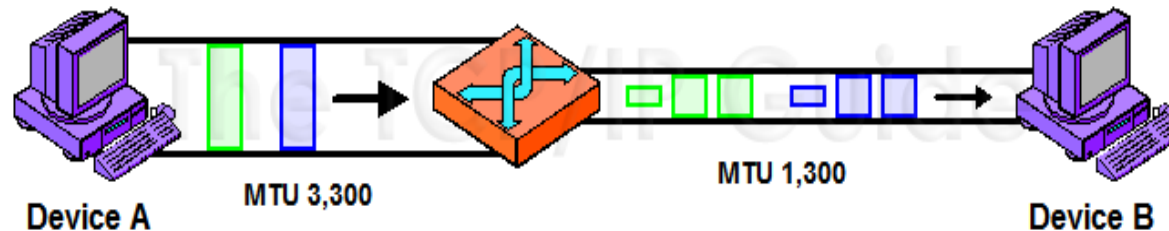
Fragmentation des datagrammes (paquets) IP

- Sur toute machine ou routeur mettant en oeuvre TCP/IP, une unité maximale de transfert (*Maximum Transfer Unit* ou MTU) définit la taille maximale d'un datagramme véhiculé sur le réseau physique correspondant
- lorsque le datagramme est routé vers un réseau physique dont le MTU est plus petit que le MTU courant, le routeur fragmente le datagramme en un certain nombre de fragments, véhiculés par autant de trames sur le réseau physique correspondant
- lorsque le datagramme est routé vers un réseau physique dont le MTU est supérieur au MTU courant, le routeur route les fragments tels quels,
- le destinataire final reconstitue le datagramme initial à partir de l'ensemble des fragments reçus ; la taille de ces fragments correspond au plus petit MTU emprunté sur le réseau. Si un seul des fragments est perdu, le datagramme initial est considéré comme perdu : la probabilité de perte d'un datagramme augmente donc avec la fragmentation.

Fragmentation des datagrammes (paquets) IP

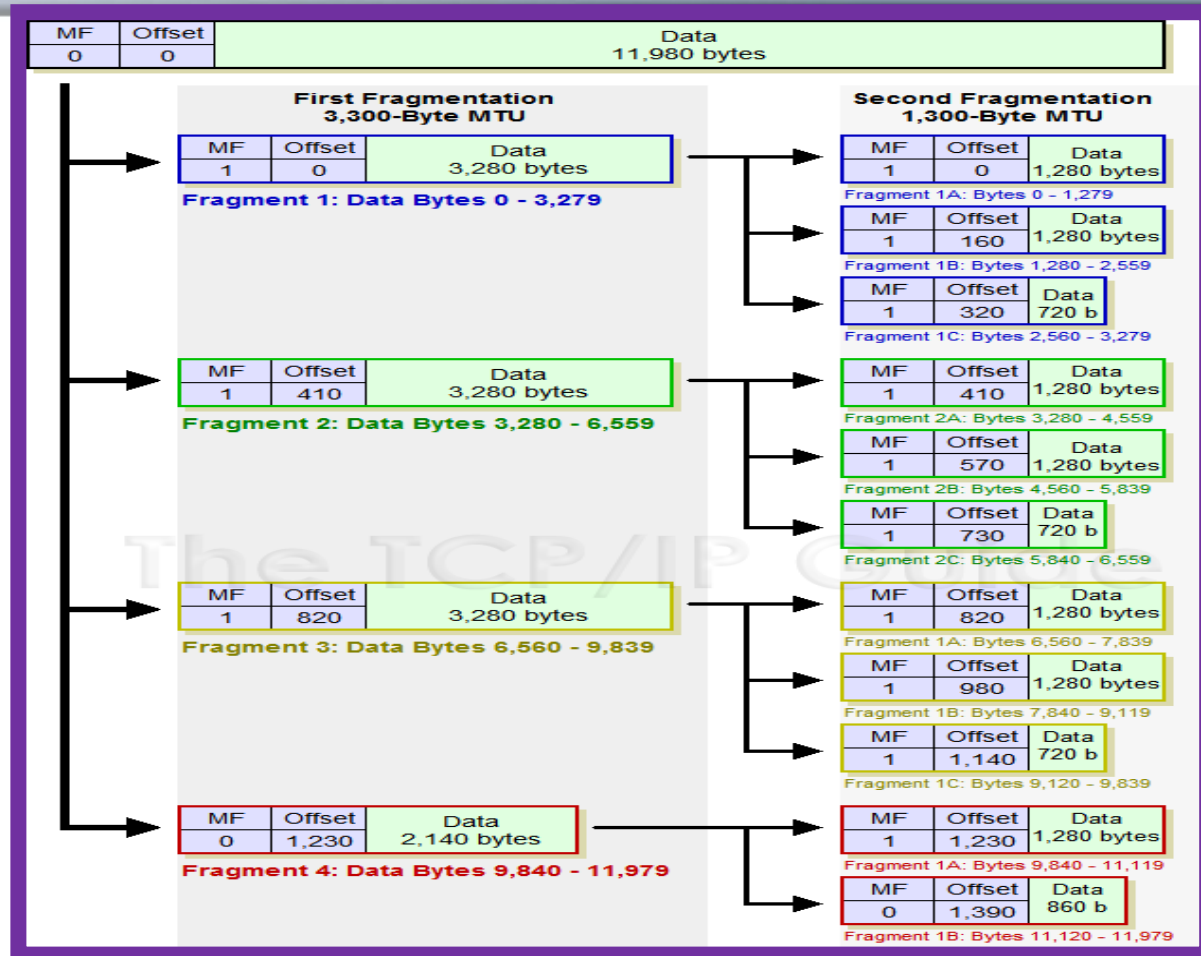
▪ Exemple

- Dans cet exemple simple, le terminal A envoie au Terminal B via un petit inter-réseau composé d'un routeur et de deux liaisons physiques. Le lien de A vers le routeur a un MTU de 3300 octets, mais du routeur vers B, il n'est que de 1300 octets. Ainsi, tous les datagrammes IP de plus de 1 300 octets devront être fragmentés.



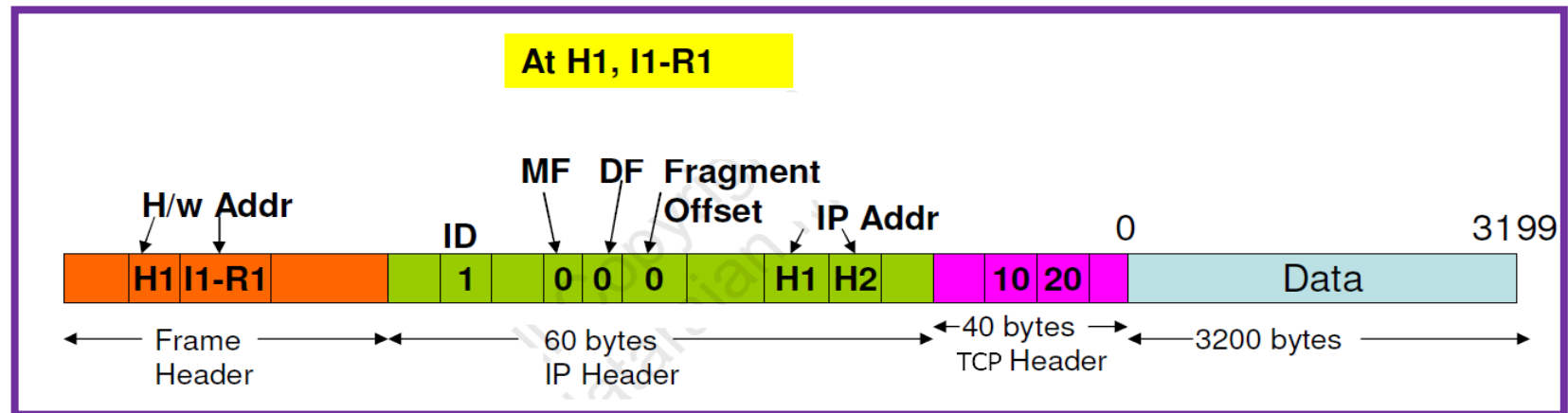
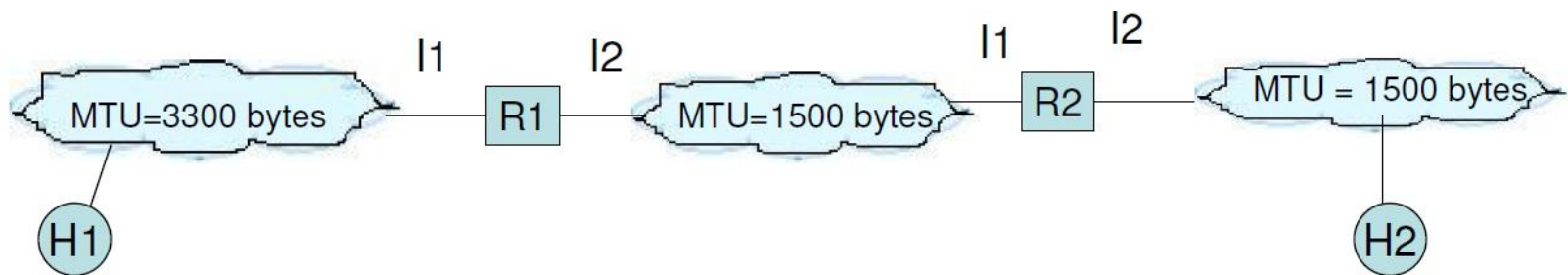
Fragmentation des datagrammes (paquets) IP

■ Exemple (suite)

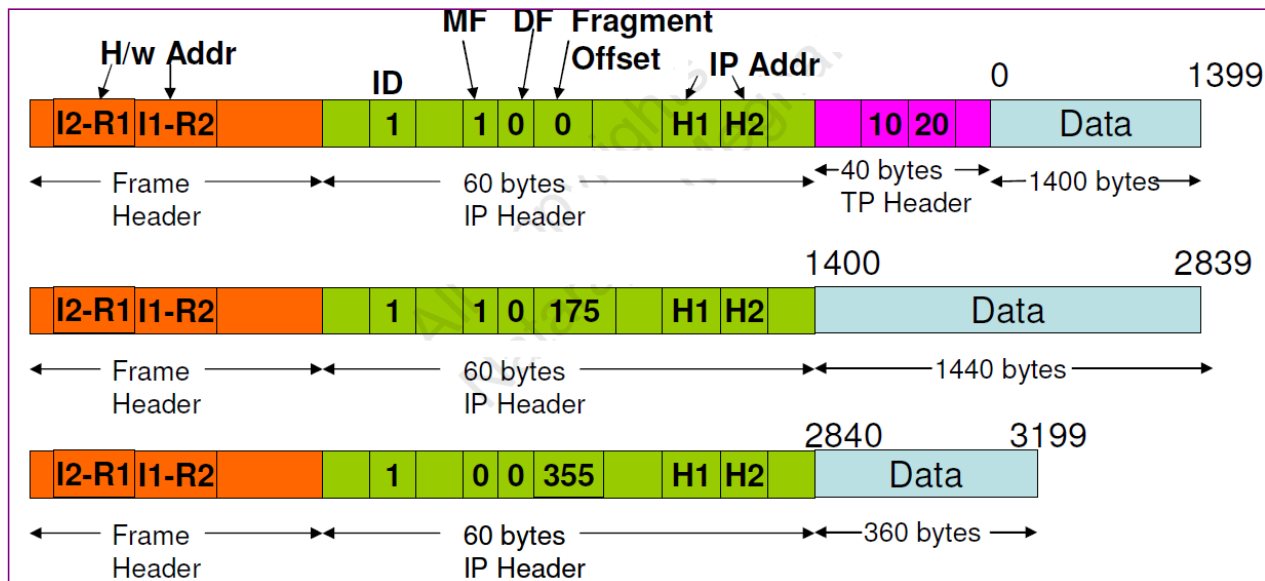
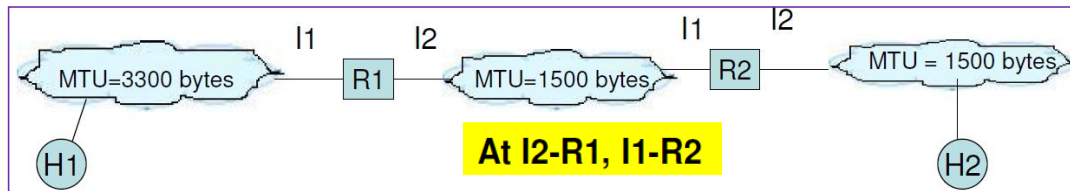


Fragmentation des datagrammes (paquets) IP

- Exemple où un segment TCP est encapsulé dans un paquet IP :

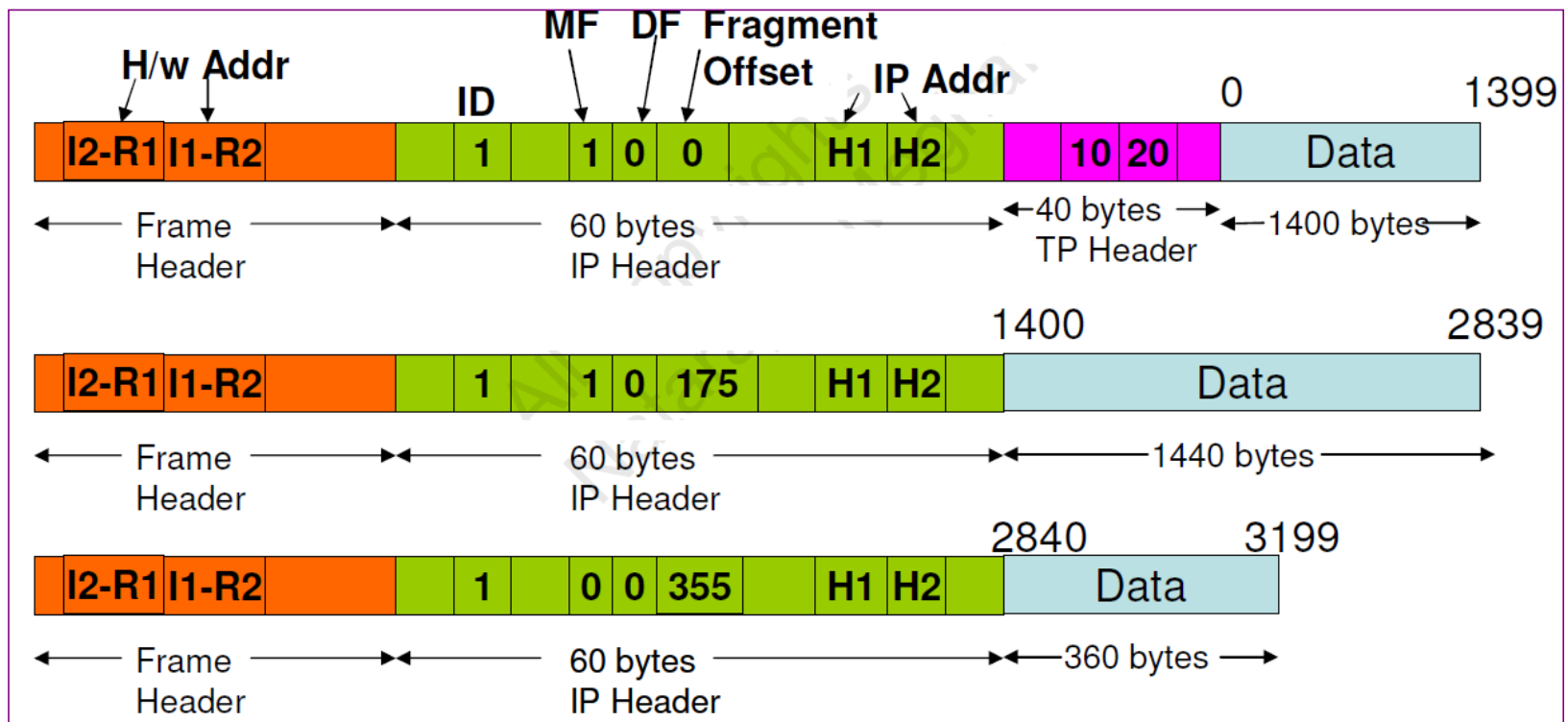


Fragmentation des datagrammes (paquets) IP



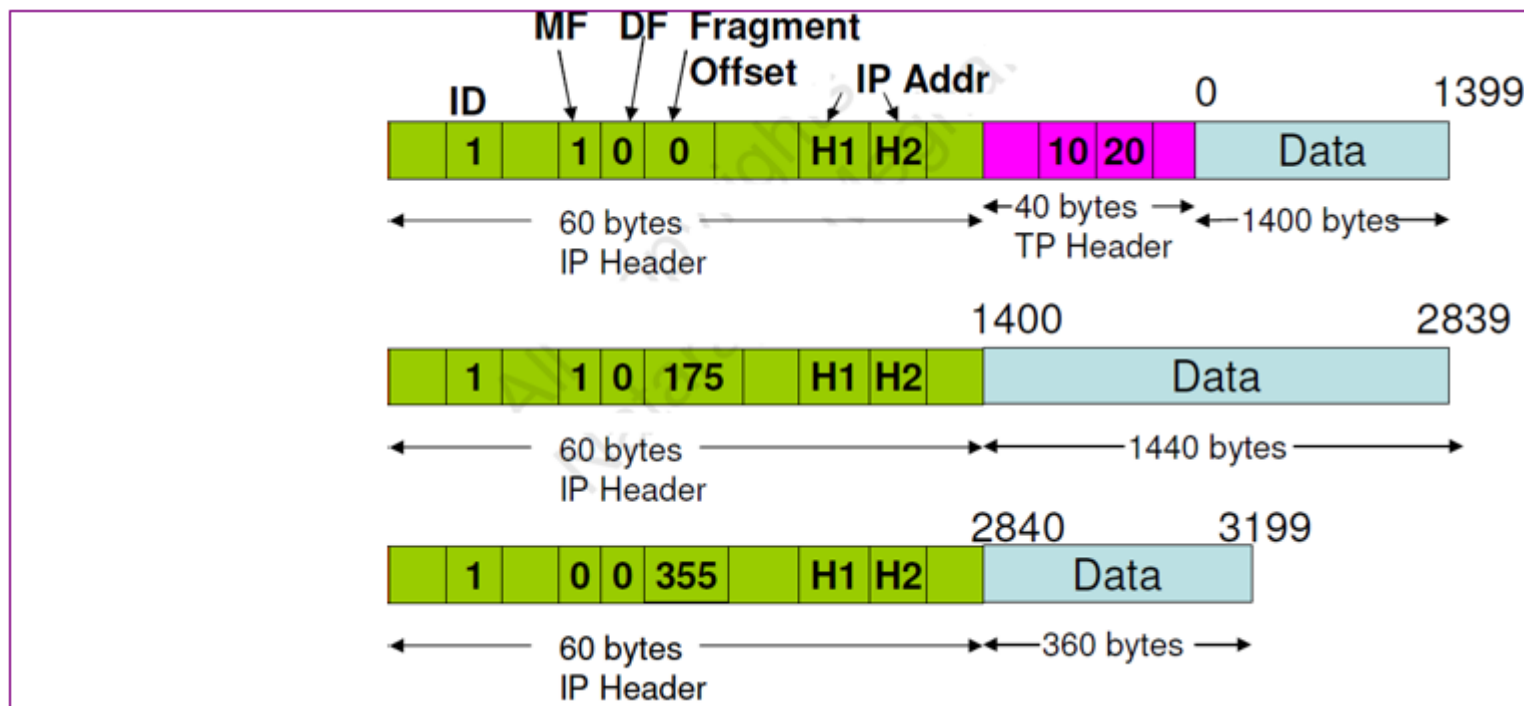
Défragmentation des datagrammes (paquets) IP

- Assemblage
 - Les trois fragments arrivent au niveau de la **couche 2** de la machine H2



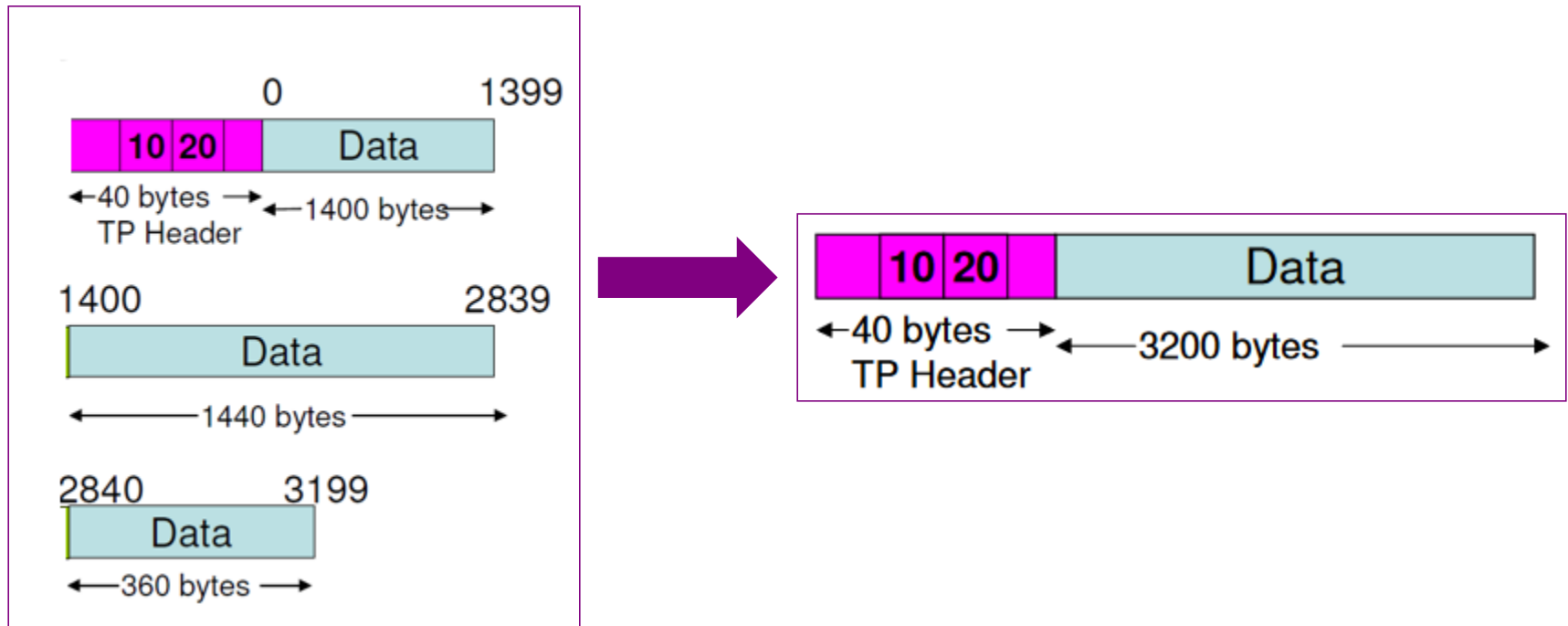
Défragmentation des datagrammes (paquets) IP

- Assemblage (suite):
 - Les trois fragments remontent au niveau de la couche réseau (IP Layer) de la machine H2 ; les fragments sont, maintenant, débarrassés de leurs enveloppes Ethernet
 - Les trois fragments sont réordonnés



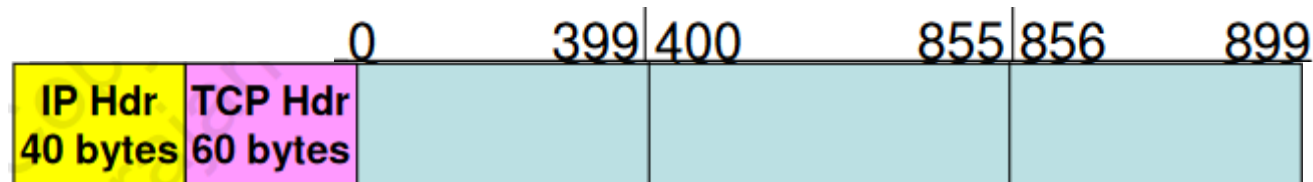
Défragmentation des datagrammes (paquets) IP

- Assemblage (suite):
 - Les trois fragments réassemblés et réordonnés sont remontés au niveau TCP
 - Ils seront débarrassés de leurs enveloppes IP et mis bout à bout



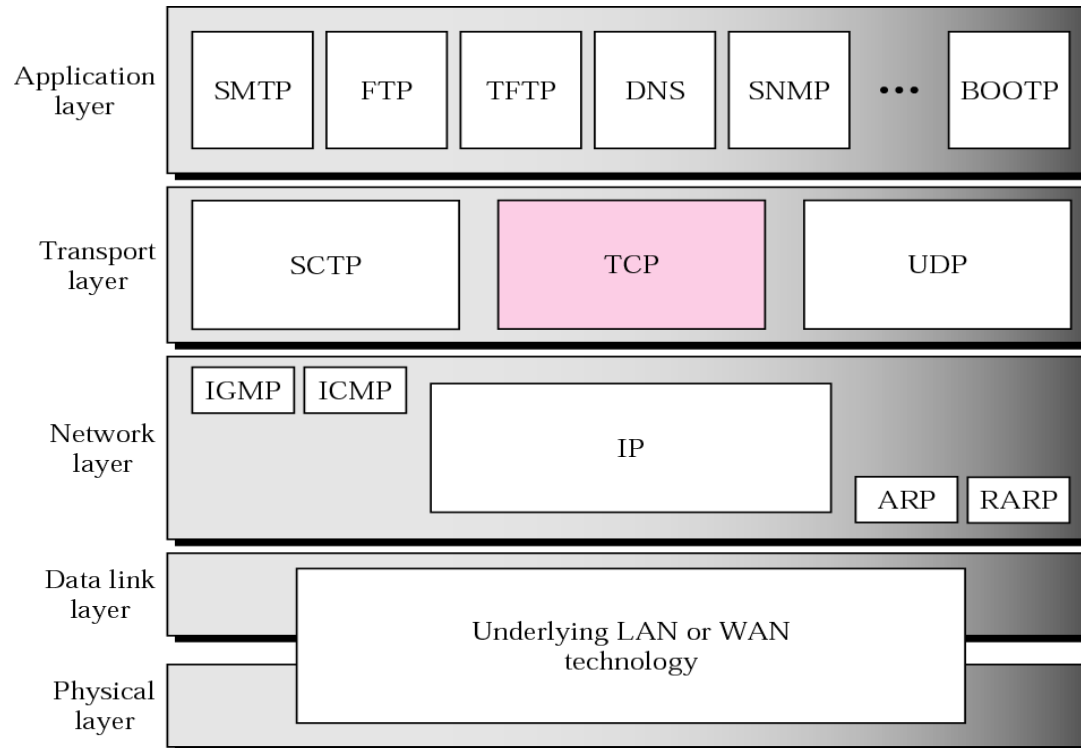
Fragmentation des datagrammes (paquets) IP

- Supposez que l'on veuille un datagramme IP être via un sous-réseau physique de MTU 500 octets. Calculer les valeurs de décalage de fragments pour les différents fragments?
 - IP header = 40 bytes
 - TCP header = 60 bytes
 - Data = 900 bytes



- Solution:
- Fragment 1: IP hdr = 40; TCP hdr = 60;
 - Data = 400 [byte #s: 0 - 399]; Offset = 0
- Fragment 2: IP hdr = 40;
 - Data = 456 [byte #s: 400 - 855]; Offset = 50
- Fragment 3: IP hdr = 40;
 - Data = 44 [byte #s: 856 - 899]; Offset = 107

Couche de transport TCP



- Quels sont les services offerts par TCP?

Couche de transport TCP

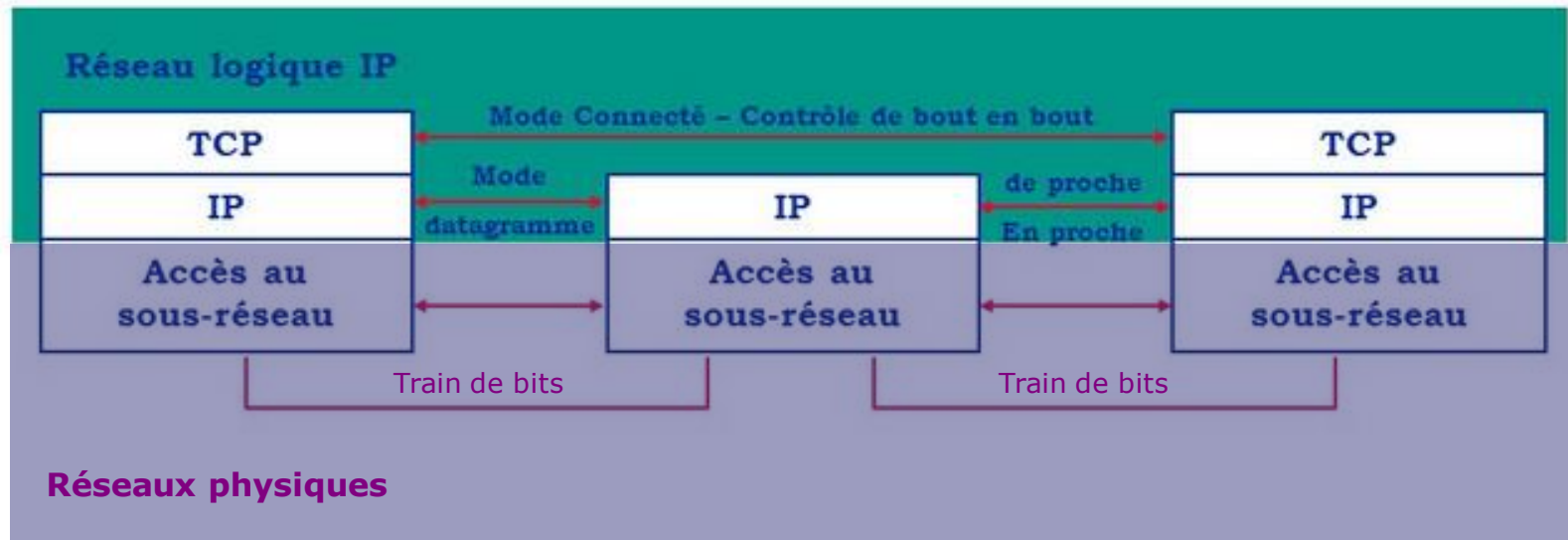
- TCP fournit un service de communication de processus à processus en utilisant des numéros de port.
- TCP fournit un service de streaming de flux. Il segmente les données du flux en segments de taille variable. Chaque segment reçoit un en-tête et est transféré à la couche IP.

Numéros des ports standards utilisés par TCP

<i>Port</i>	<i>Protocol</i>	<i>Description</i>
7	Echo	Echoes a received datagram back to the sender
9	Discard	Discards any datagram that is received
11	Users	Active users
13	Daytime	Returns the date and the time
17	Quote	Returns a quote of the day
19	Chargen	Returns a string of characters
20	FTP, Data	File Transfer Protocol (data connection)
21	FTP, Control	File Transfer Protocol (control connection)
23	TELNET	Terminal Network
25	SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
53	DNS	Domain Name Server
67	BOOTP	Bootstrap Protocol
79	Finger	Finger
80	HTTP	Hypertext Transfer Protocol
111	RPC	Remote Procedure Call

Couche de transport TCP

- Réseau logique et modes de mise en relation



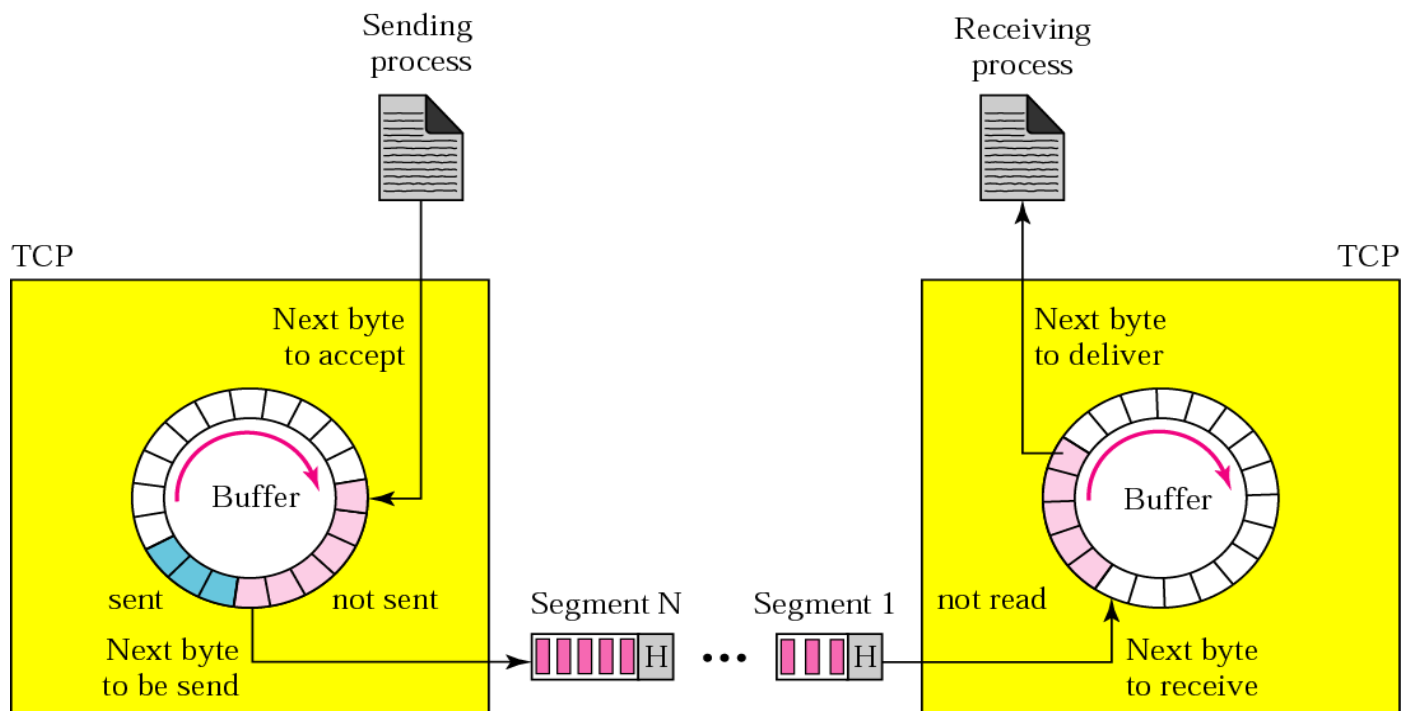
Couche de transport TCP

TCP est orienté connexion. Un protocole de transport orienté connexion établit un « chemin virtuel » entre la source et la destination :

- Tous les segments appartenant à un message sont ensuite envoyés sur ce chemin virtuel.
- Une transmission orientée connexion nécessite trois phases: établissement de connexion, transfert de données et terminaison de connexion.
- Tous les octets transférés sont numérotés par TCP. La numérotation commence avec une valeur aléatoire (Sequence number)

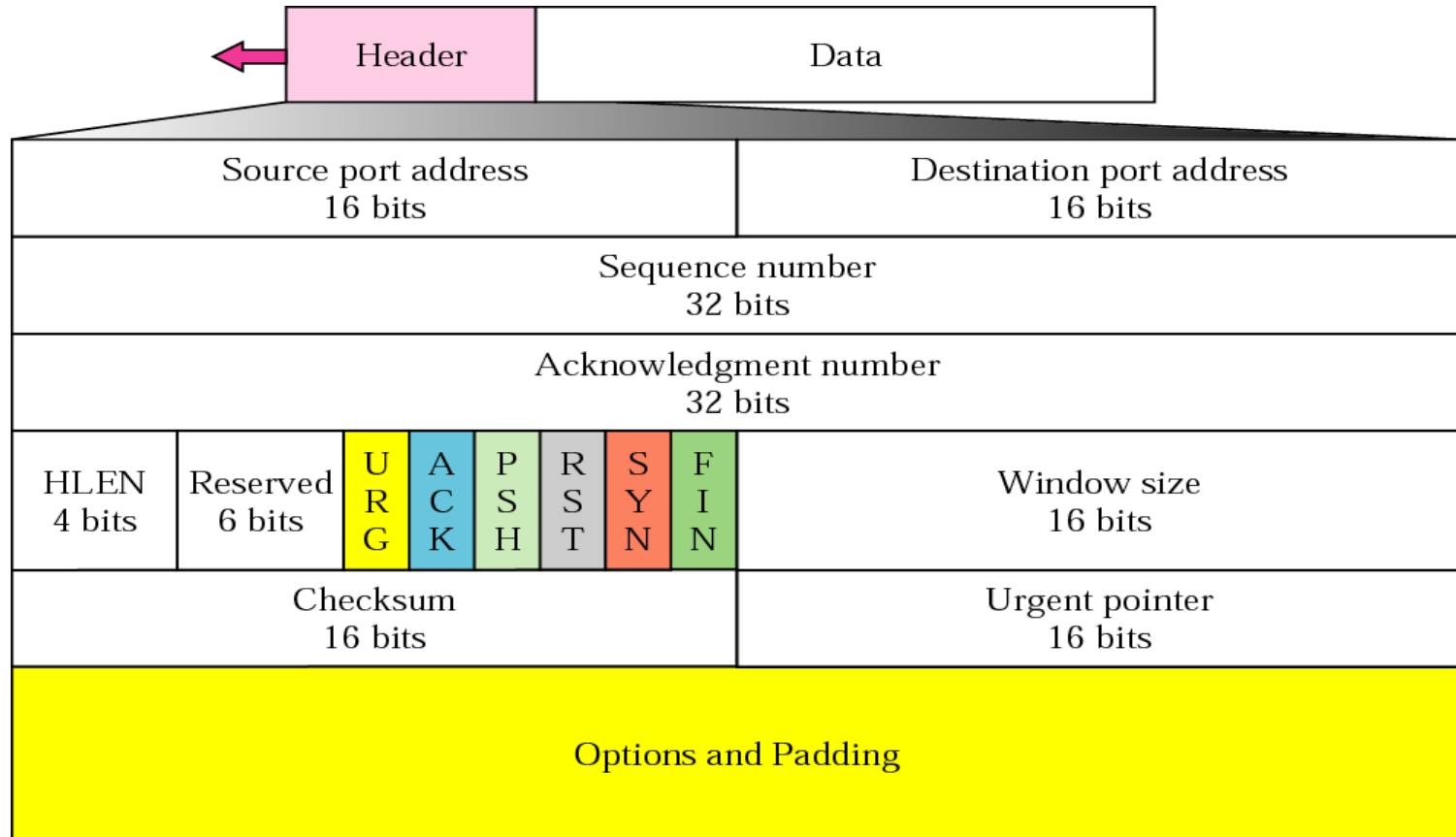
Couche de transport TCP

TCP fournit un service de streaming de flux en full-duplex. Il segmente les données flux en segments de taille variable. Chaque segment reçoit un en-tête et est transféré à la couche IP.



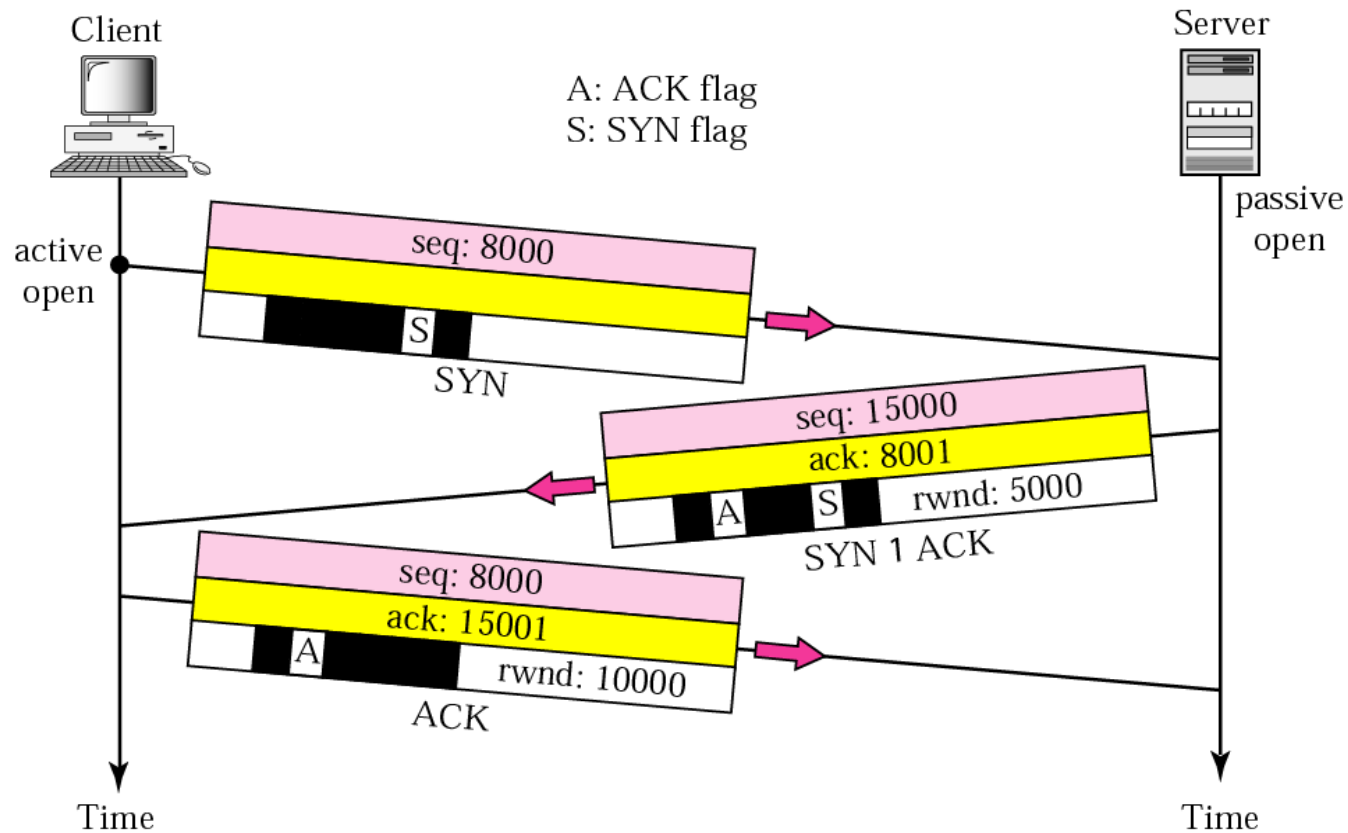
Couche de transport TCP

- En-tête TCP



Couche de transport TCP

- 3-ways handshake : établissement de connexion



Couche de transport TCP

Un segment SYN ne peut pas transporter de données, mais il consomme un “sequence number”.

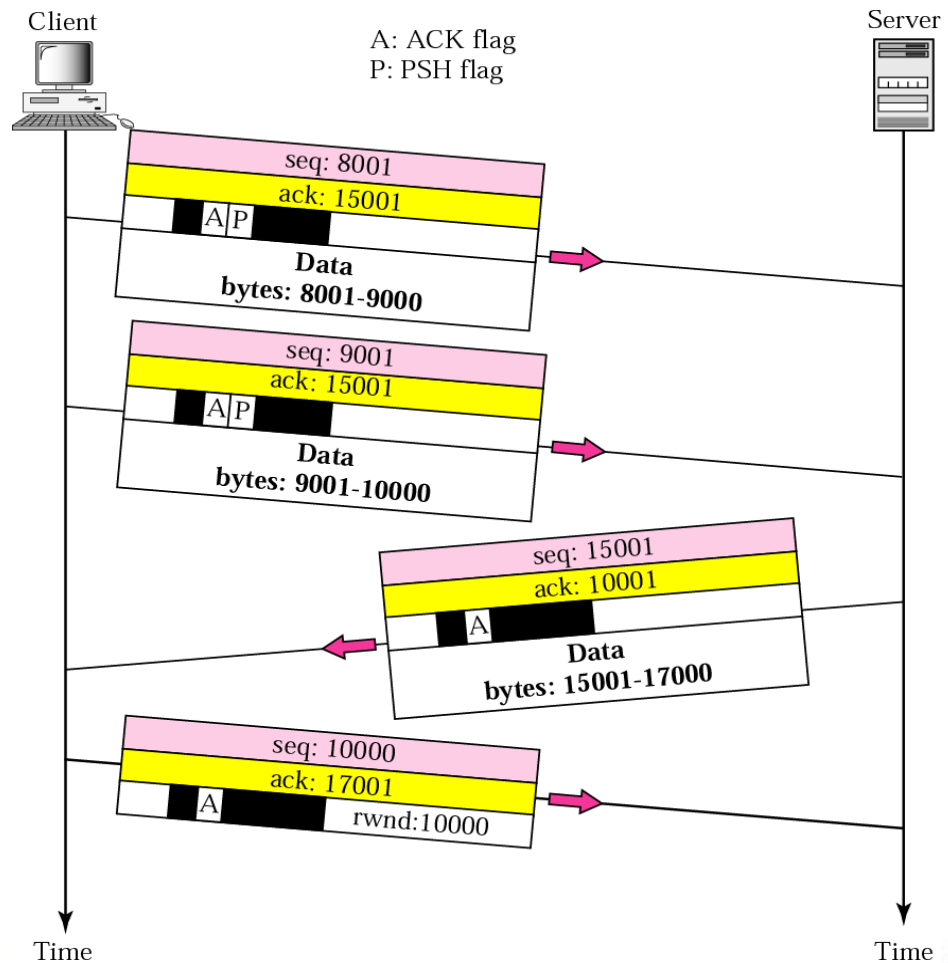
Un segment A SYN + ACK ne peut pas transporter de données, mais il consomme un “sequence number”.

Un segment ACK, s’il ne transporte pas de données, ne consomera aucun “sequence number”

Un segment FIN, s’il ne transporte pas de données, consomera un “sequence number”

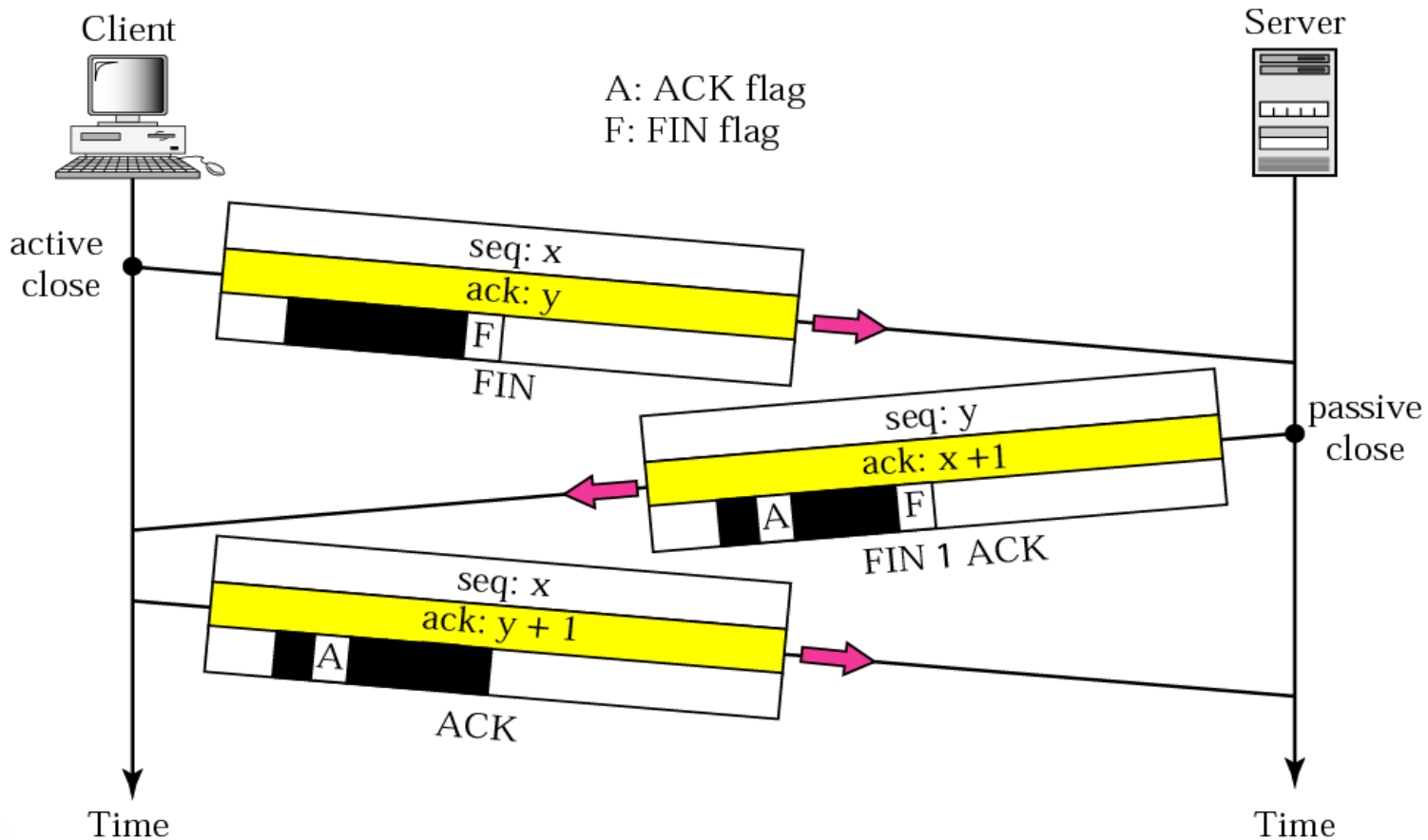
Couche de transport TCP

- transfert de données



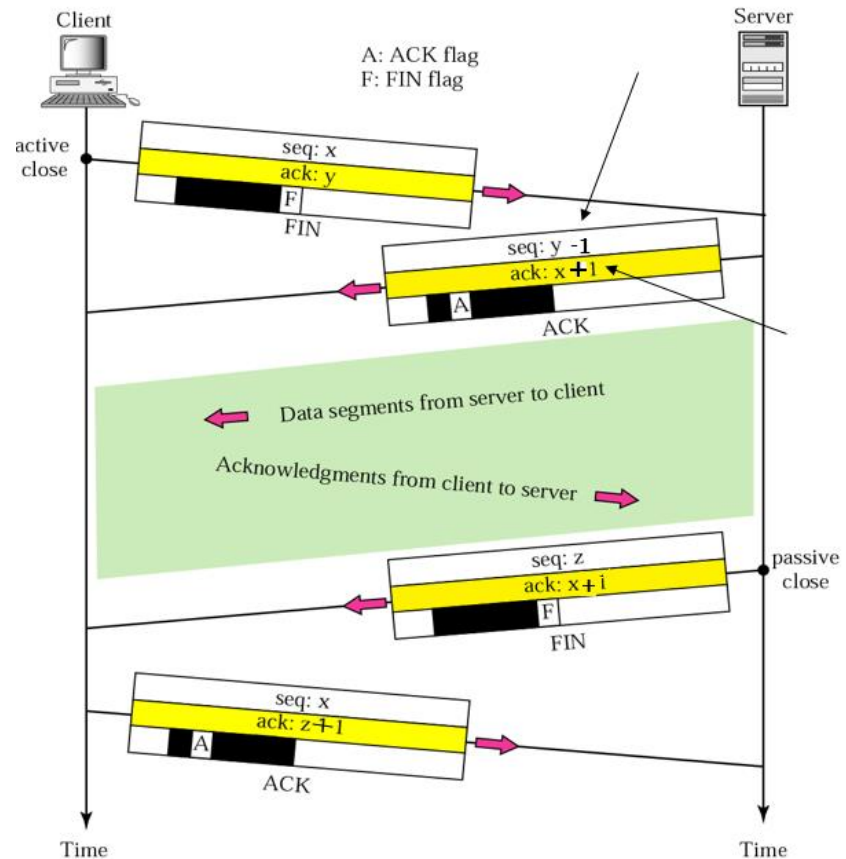
Couche de transport TCP

- terminaison de connexion



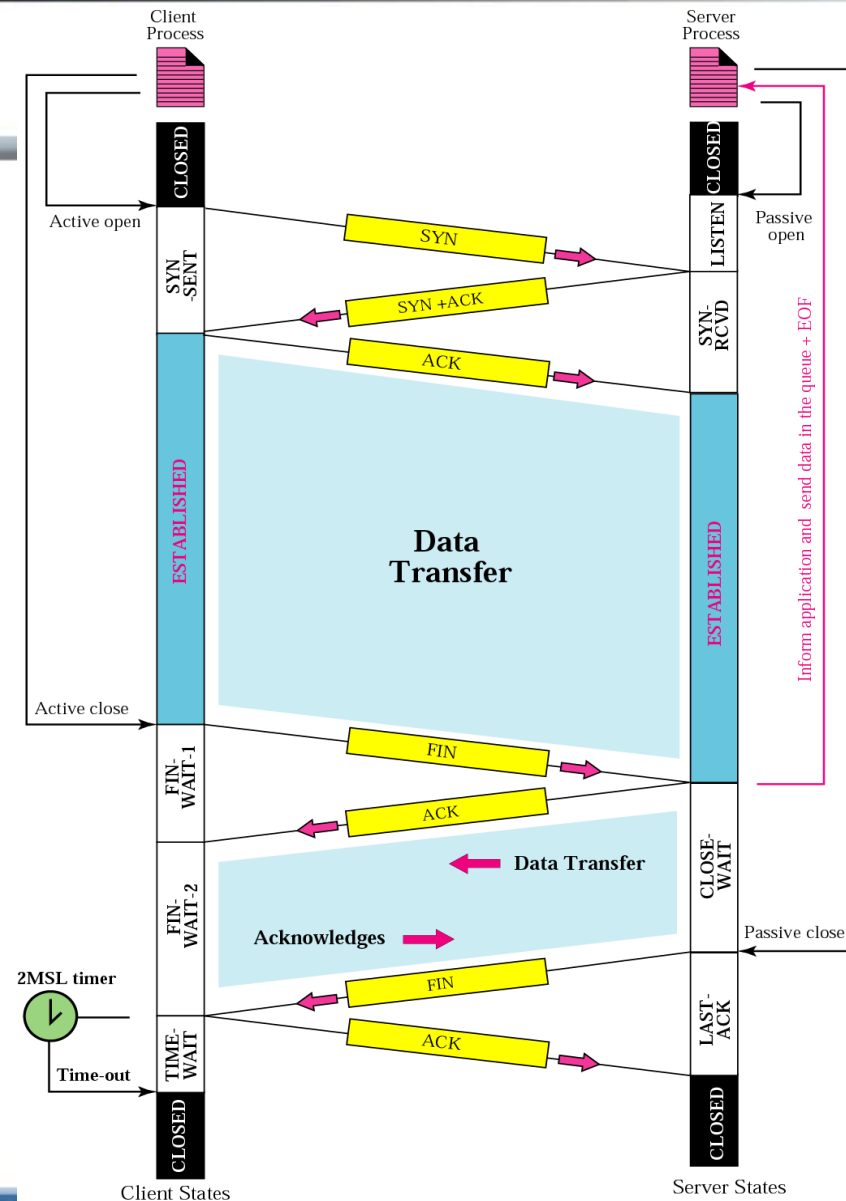
Couche de transport TCP

- ½ terminaison de connexion
 - Le client termine mais,
 - Pas le serveur



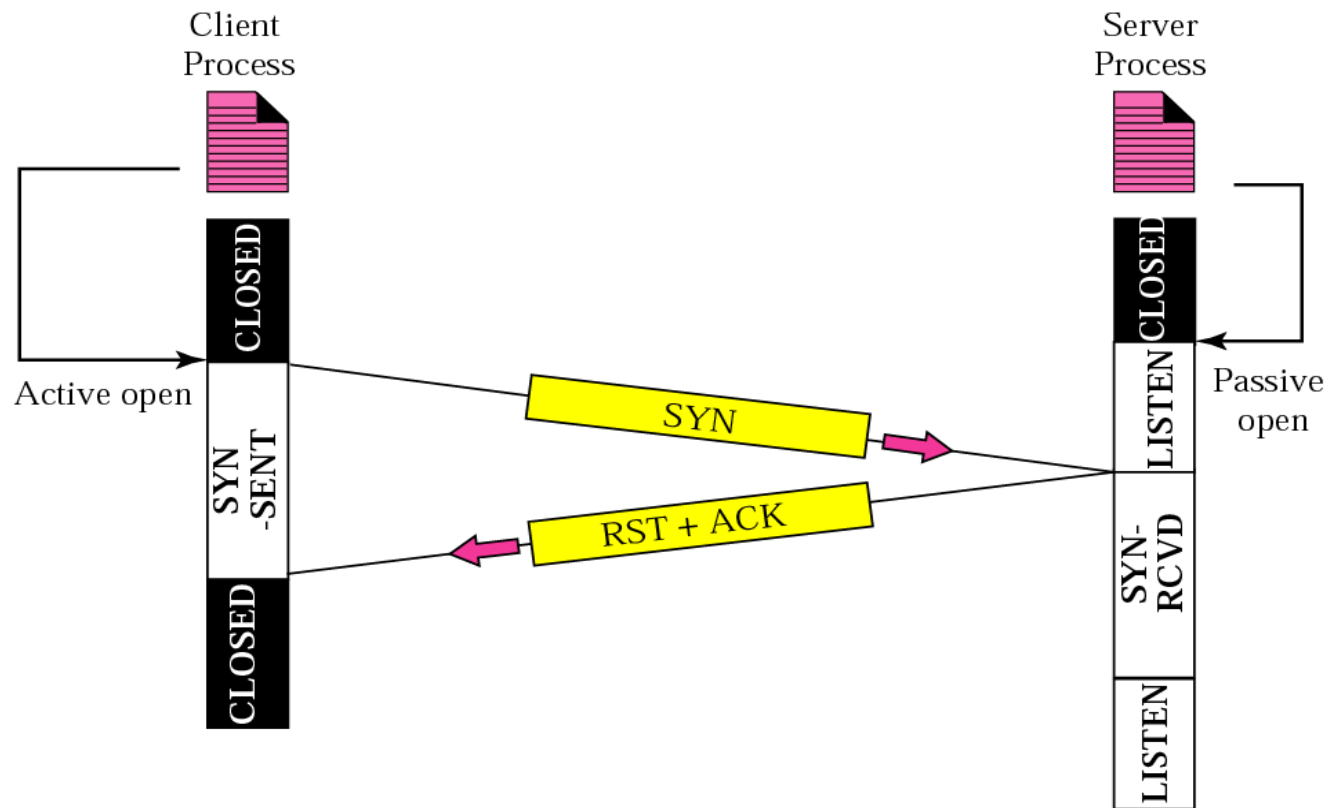
Couche de transport TCP

- TCP comme une machine à états finis



Couche de transport TCP

- Refus de demande de connexion



Couche de transport TCP

- Demande de destruction de connexion

