Système et Réseaux (S5) / L3 Miage

Cours Réseaux

2020-2021

CM 3 :
Couche Liaison

D'après le cours de Bruno Martin et les slides du livre "Computer Networking: A Top Down Approach, 6th edition, Jim Kurose, Keith Ross, Addison-Wesley, March 2012"

Ramon APARICIO-PARDO

Ramon.Aparicio-Pardo@unice.fr

PLAN CM 3

1. COUCHE DE LIAISON
2. FONCTIONS DE LA COUCHE LIAISON
3. DETECTION ET CORRECTION D'ERREURS
4. CONTRÔLE D'ACCÈS AU SUPPORT (MAC)
5. ETHERNET
6. DU HUB AU SWITCH
7. ARP/RARP

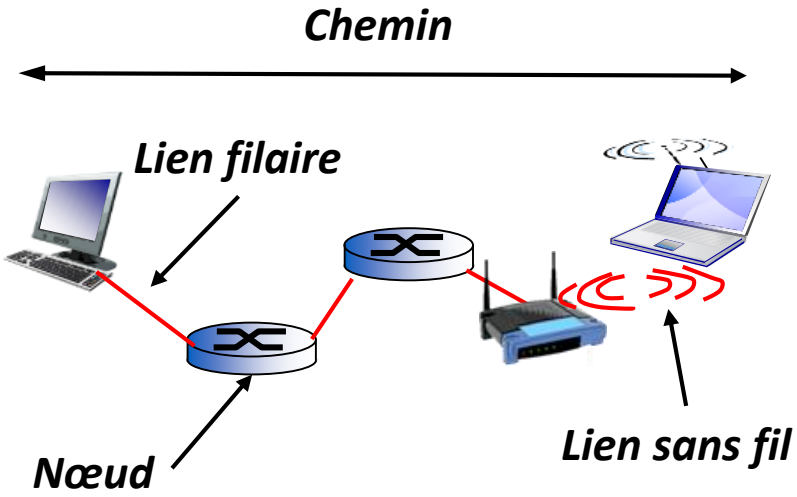
Vue d'ensemble de la couche liaison

- La couche liaison :
  - définit les procédures d'exploitation du lien de communication
  - permet l'envoi de trames en séquence
  - détecte et corrige les erreurs du support physique
  - contrôle l'accès au canal partagé (sous-couche MAC)

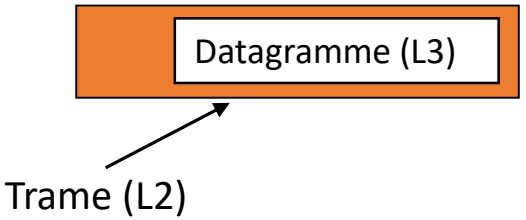
- Ethernet [Standard 802.3] :
  - Protocole principal de la couche liaison
  - Plusieurs standards selon le moyen physique (WiFi, câble, fibre optique)
  - Adresses matérielles (MAC)
  - Implémenté dans les interfaces réseau (*network interface card, NIC*)

Terminologie de la couche liaison

- ***Nœuds*** :
  - hôtes et routeurs
- ***Liens*** :
  - Canaux de communication qui connectent 2 nœuds adjacents le long du *chemin* de communication
  - *liens filaires*
  - *liens sans fil*

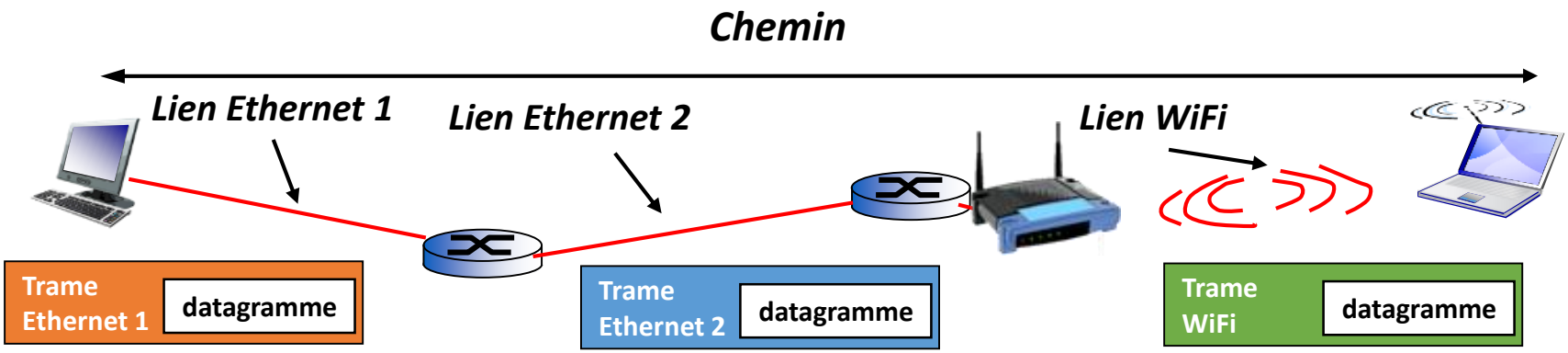


- ***Trame (frame)*** *:* paquet de la couche 2-*liaison* :
  - encapsule un *datagramme* (paquet de la couche 3-*réseau*)



Terminologie de la couche liaison

- **Objectif** de la couche *liaison*:
  - La couche liaison a la ***responsabilité*** du *transfert* des datagrammes d'un nœud au nœud *physiquement adjacent* sur un lien
  - datagramme transféré par *différents protocoles de liaison* sur *différentes liaisons :*
    - p. ex., *Ethernet (802.3)* sur la première liaison, *802.11 (WLAN - WiFi)* sur la dernière liaison
  - chaque protocole de liaison fournit des services différents
    - p. ex., *transfert fiable* sur le lien



Fonctions de la couche liaison

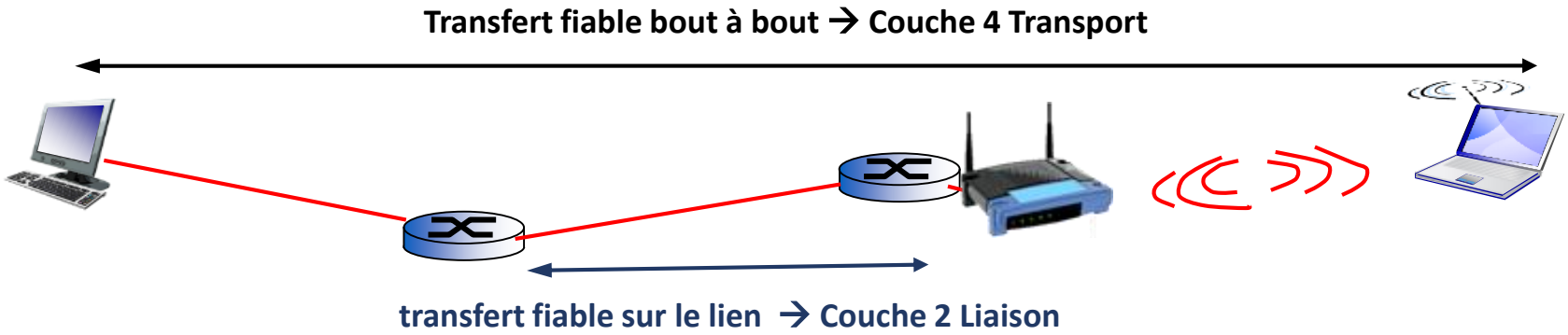
- **Mise en trames des datagrammes *(framing)***
  - Encapsuler un datagramme dans une trame, en ajoutant un en-tête et une queue de bande
- **Contrôle d'accès au support** (*Media Access Control ou MAC)*
  - Comment accéder au canal si support partagé par plusieurs nœuds
- **Adressage "MAC" dit** *physique ou matériel*
  - Adresses MAC utilisées dans les en-têtes de trame pour identifier la source et la destination
  - Différent de l'adressage IP dit *logique*
- **Transfert fiable entre les nœuds adjacents (*reliable data transfert*)**
  - Garanti que tous les paquets sont reçus correctement : si un paquet n'est pas reçu par le récepteur, il est retransmis
  - ***Souvent utilisé pour*** des liaisons avec des taux d'erreur élevés (***liaison sans fil***) afin de corriger une erreur localement, sur la liaison sur laquelle l'erreur se produit.
  - ***Rarement utilisé sur*** les liaisons à faible erreur de bit (***fibre, paire torsadée***). Ça ne vaut pas la peine, on fera confiance à d'autres solutions :
    - Code de détection et correction d'erreurs→ à exécuter dans le récepteur
    - S'il faut retransmettre, on le fera *bout à bout* (transfert fiable sur tout le chemin) → on verra cela dans la couche transport

Fonctions de la couche liaison

- **Contrôle de flux *(flow control)* :**
  - Régler le débit de transmission entre les nœuds émetteur et récepteur adjacents pour empêcher un émetteur rapide d'accabler un récepteur lent.
- **Détection d'erreur :**
  - Erreurs causées par l'atténuation du signal, le bruit.
  - Le récepteur détecte la présence d'erreurs:
    - signale à l'expéditeur pour la retransmission ou jette la trame erronée
- **Correction des erreurs:**
  - Le récepteur identifie et corrige les erreurs de bits sans recourir à la retransmission
- ***Semi-duplex / full-duplex***
  - en *semi-duplex*, les nœuds situés aux deux extrémités du lien peuvent transmettre, mais pas en même temps
  - en *full duplex*, même en même temps

Fonctions de la couche liaison

- Historiquement, il y a eu beaucoup de protocoles de liaison qui implémentaient à des degrés différents cette liste de fonctions.
- Actuellement, où le protocole l'Ethernet (IEEE 802.3) est le protocole dominant, les fonctions telles que le *transfert fiable* ou le *contrôle de flux* sont réalisées par la *couche de transport* au niveau de tout le chemin (*bout à bout*),
  - c.-à-d. pas entre deux nœuds adjacents mais entre deux systèmes aux extrémités du chemin.
- On verra toutes les autres fonctions dans les diapositives suivantes : *détection/correction d'erreur, contrôle d'accès au support, framing, adressage "MAC"*



Détection et correction d'erreurs

- Longtemps la détection et la correction d'erreurs relevaient de la couche de lien (niveau 2)
- En effet, la qualité des lignes physiques était très insuffisante pour obtenir des taux d'erreurs acceptables dans les trames de niveau 2
- La situation actuelle a très sensiblement changé pour deux raisons essentielles :
  - La *fiabilité* des lignes s'est beaucoup *accrue*. Le taux d'erreur est $< 10^{-9}$ et souvent moins encore. Ceci a été rendu possible par :
    - des techniques de codages plus efficaces
    - de nouveaux supports physiques filaires : fibre optique, ...
  - La *nature des applications* (*multimédia*, ...). Certaines ne tolèrent pas les pertes de temps associées aux reprises sur erreurs. La *perte* de quelques bits *ne change rien* quant à la qualité que l'œil ou l'oreille peuvent percevoir. Des délais seraient, eux, beaucoup plus détectables

Détection et correction d'erreurs

- La détection et la correction restent toutefois indispensables :
  - sur des supports de mauvaise qualité (des ondes radioélectriques, …)
  - pour des applications ne tolérant pas la moindre erreur (transfert de fichier, ...)
- Pour la détection/correction, deux grandes possibilités existent :
  1. Toujours envoyer *avec* des bits redondants pour *détecter et corriger*
  2. Toujours envoyer *avec* des bits redondants pour *détecter,* après retransmettre si une erreur est détectée
- Quel système choisir ?
  - la *détection/correction* exige un *accroissement* d'environ *50%* de l'information transportée. Ainsi, pour envoyer 1.000 bits utiles en toute sécurité, il faut envoyer 1.500 bits
  - la *détection seule* se contente d'une augmentation de *16 à 32 bits*. Ce n'est qu'en cas d'erreurs avérées, que la retransmission intégrale de l'information doit être faite

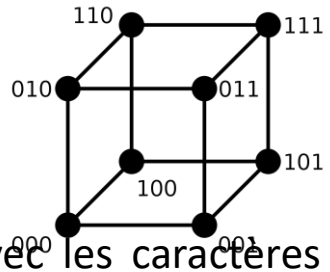
Détection et correction d'erreurs

- Le *point neutre* pour des trains de bits compris entre 1.000 et 10.000 bits est donc d'environ un taux d'erreur de 10^{-4} :
  - si le taux d'erreur est plus faible, une détection est utilisée
  - si le taux d'erreur est plus élevé, la correction est plus intéressante
- Or, les supports ont quasiment tous un taux d'erreurs < 10^{-4} ➔ ***La détection avec retransmission est donc majoritairement utilisée***
- La détection / correction d'erreurs suppose :
  - l'utilisation d'algorithmes complexes (temps de traitement non négligeable)
  - une augmentation importante de l'information à transporter (redondance)
- Tout d'abord, le système trivial :
  - bien que n'offrant que peu de garantie, une méthode consiste à envoyer 3 fois la même information et à choisir la plus probable :
    - *envoi 3 bits à 1, réception 2 bits à 1 et 1 bit à 0*
    - *P(bonne valeur =1) = 2/3 , P(bonne valeur =0) = 1/3*
    - ***On choisit 1 comme bonne valeur correcte***

Détection et correction d'erreurs

❖ **Notion de code de *Hamming* :**

- Pour pouvoir corriger les erreurs, il faut pouvoir distinguer les différents caractères émis, même s'ils sont erronés
- supposons un mini alphabet de 4 caractères : *00, 01, 10, 11*
- si une erreur se produit, le caractère est « transformé » en un autre caractère (valide) de ce même alphabet et l'erreur passe inaperçue :
  - envoi de 00 et réception de 10. Le caractère reçu bien qu'erroné fait partie de l'alphabet
- Il nous faut donc *ajouter* de l'information :
  - 00 → **00***000*
  - 01 → **01***111*
  - 10 → **10***110*
  - 11 → **11***001*



- Si ***une erreur*** se produit, on compare la donnée transmise avec les caractères valides de l'alphabet. On en déduit le bon en faisant le rapprochement avec celui qui ressemble le plus :
  - Si 10000 reçu, le plus proche est **00000** (distance +1) car les autre possibilités **10110** et **11001** (distance +2) sont plus éloignées.

Détection et correction d'erreurs

❖ **Notion de code de *Hamming* :**

- Si ***deux* erreurs** se produisent sur le même caractère, il devient impossible, dans le contexte ci-dessus, de récupérer la valeur exacte.
- Exemple : Emission de *10110* et réception de **10101**. L'estimation du caractère correct n'est plus possible. Il y a deux options (l'une est la bonne) à la distance la plus petite(2):
  - ***10110*** → la bonne à distance 2
  - **11001** → mais celle-ci est encore un caractère valide à distance 2

- Soit *d(x,y)* la distance entre deux caractères *x* et *y* de même longueur définie comme le nombre de bits (positions) différents, on définit la distance de *Hamming* comme étant :

$$d_H = inf\ d(x,y)$$

où la borne inférieure s'applique à l'ensemble des caractères valides de l'alphabet

- c.-à-d., la distance la plus petite entre deux *caractères valides de l'alphabet*

Détection et correction d'erreurs

- **Notion de code de *Hamming* :**
  - dans l'exemple ci-dessus, le calcul de d_H donne 3
  - pour pouvoir corriger *une seule erreur*, il faut que les différents caractères valides du même alphabet satisfassent $d_H = 3$, de sorte que, en cas d'erreur, la distance entre le caractère correct et le caractère erroné soit de 1
    - *Encore n'importe quel autre caractère valide est à distance 2 par définition*
  - Pour corriger *2 erreurs à la fois*, la d_H doit valoir 5 :
    - le nouvel alphabet vaut alors :
      - 00 → *00000000*
      - 01 → *01111011*
      - 10 → *10110101*
      - 11 → *11001110*
  - En recevant le caractère *10001010*, on en déduit que le caractère correct est *11001110* puisque c'est le seul caractère de notre alphabet à avoir une distance de *Hamming* de 2 avec le caractère erroné reçu :
    - d(10001010,11001110) = 2
    - d(10001010,x) > 2 si x ≠ 11001110

Détection et correction d'erreurs

- **Bits de parité**, une autre méthode que l'on peut déterminer à partir d'un caractère (souvent un octet)
  - le bit de parité est un bit supplémentaire ajouté au caractère « protégé »
  - il est calculé en sorte que la *somme des éléments binaires (nombre de bits à 1) modulo 2* soit égal à 0 ou à 1
    - Dans le cas **pair**, le bit de **parité** est 1 si le nombre de bits à 1 est **impair**.
    - Dans le cas **impair**, le bit de **parité** est 1 si le nombre de bits à 1 est **pair**.
- Exemple : soit le caractère 10011001, on pose une *parité paire*
  - il faut donc ajouter un bit valant 0 : 10011001 **0**
  - si une erreur se produit lors de la transmission :
    - 10111001 **0**
    - alors, le nombre de bits à 1 n'étant pas pair, on détecte qu'une erreur s'est produite
  - problème :
    - Il faut ajouter un bit tous les 8 bits (12,5 % de charge)
    - deux erreurs sur le même octet ne sont pas détectables :
    - 01011001 0 passera inaperçu !!!!

Détection et correction d'erreurs

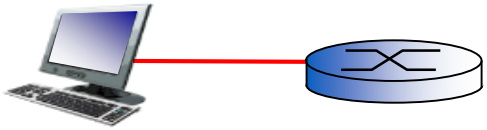
- ***Cyclic Redundancy Checksum:*** Une autre méthode, plus efficace, qui repose sur une division de polynômes :
  - les deux parties (émetteur, récepteur) se mettent d'accord sur un polynôme (ex. de degré 16 : $X^{16}+X^8+X^7+1$) : le *générateur*
  - à partir des éléments binaires de la trame notés a_i, i = 0 → M-1, M étant le nombre de bits de la trame, on constitue le polynôme de degré M – 1 :
    - $P(x) = a_0 + a_1x + ... + a_{M-1}x^{M-1}$
- Fonctionnement :
  - l'émetteur divise le polynôme issu de sa trame, par le générateur
  - le reste de cette division est un polynôme dont le degré vaut au max. 15 :
    - $R(x) = r_0+r_1x+...+r_{15}x^{15}$
  - les valeurs binaires r_0, r_1, ..., r_{15} sont placées par l'émetteur dans la partie de contrôle de la trame
  - à l'arrivée, le récepteur effectue le même travail
  - il compare le reste qu'il a calculé avec celui se trouvant dans la partie de détection
  - si les deux restes sont identiques, alors la transmission s'est bien passée

Détection et correction d'erreurs

- ***Cyclic Redundancy Checksum***
- Cette méthode détecte quasiment toutes les erreurs, mais :
  - si une erreur se glisse dans la partie de détection, on conclut à une erreur sur la partie donnée même si elle est correcte
- Exemple de division polynomiale :
  - soit à transmettre 1101011011 → ceci donne $P(x) = X^9+X^8+X^6+X^4+X^3+X^1+X^0$
  - soit le générateur 10011 → ceci donne $G(x) = X^4+X^1+X^0$
  - le *résultat* de la division vaut → ceci donne $D(x) = X^9+X^8+X^3+X^1$: 1100001010
  - le *reste* vaut alors : → ceci donne $R(x) = X^3+X^2+X^1$, 1110
- La zone de détection d'erreurs est communément appelée :
  - *Cyclic Redundancy Checksum*
- Un autre nom courant est :
  - *Frame Check Sequence*
- **largement utilisé dans la pratique (Ethernet, WiFi 802.11)**

Contrôle d'accès au support (MAC)

- Deux types de "liens":
  - Point à Point (*point-to-point)*:
    - Le support physique est partagé uniquement par les deux nœuds directement connectés par le lien
    - Pas de collisions
    - p. ex. point à point entre *commutateur* (*switch*) Ethernet et un hôte



  - Diffusion (*broadcast*)
    - Le support physique est partagé par plusieurs nœuds
    - Collision possibles
    - Ethernet à l'ancienne (avec des nœuds *connectés en bus en partageant le même câble*)
    - Réseau local sans fil WiFI 802.11 (les nœuds *partagent le spectre radioélectrique, typiquement la même fréquence*)

Ethernet en bus

802.11 WiFi

Contrôle d'accès au support (MAC)

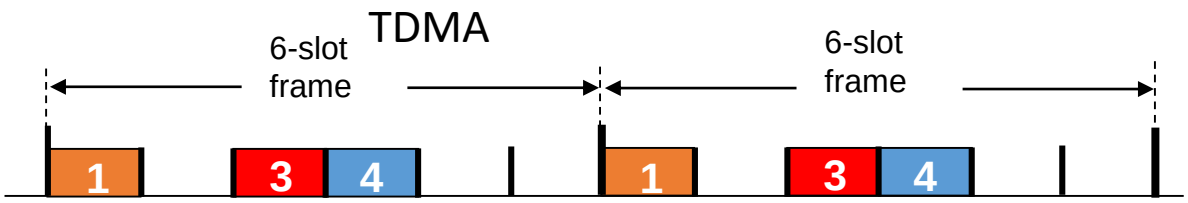
- **Canal de diffusion partagé unique**
  - Deux ou plusieurs transmissions simultanées par nœuds: brouillage
    - collision si un nœud reçoit deux signaux ou plus en même temps en provenance des deux autre machines.
- **Protocole d'accès au support**
  - Algorithme distribué qui détermine comment les nœuds partagent le canal, c'est-à-dire détermine quand le nœud peut transmettre
  - Communication sur comment partager le canal doit utiliser le canal lui-même !
    - pas de *canal hors bande* pour la coordination
- **Le protocole d'accès au support idéal**
  - **Données**: un canal de diffusion à débit *R* bps
  - **Desiderata** :
    1. lorsqu'un nœud veut émettre, il peut envoyer au débit *R*.
    2. quand *M* nœuds veulent émettre, chacun peut envoyer au débit moyen *R / M*
    3. totalement décentralisé : aucun nœud spécial pour coordonner les transmissions, pas de synchronisation des horloges, des slots
    4. simple

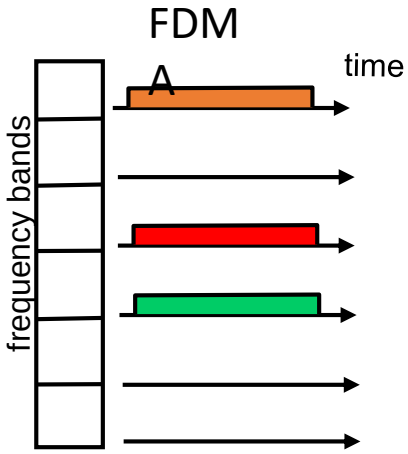
Contrôle d'accès au support (MAC)

❖ **Deux alternatives** pour satisfaire nos desiderata

1. Soit partitionner le canal

- diviser le canal en *N* « morceaux » plus petits :
  - Slots temporels: **TDMA**: *time division multiple access*
  - Bandes des fréquences: **FDMA**: *frequency division multiple access*
- attribuer un morceau à un nœud pour une utilisation exclusive
- si nœud inactif, « morceaux » inutilisé → *gâchis* de ressources
- partage le canal efficacement et équitablement à ***forte charge***
- ***inefficace à faible charge*** : retard dans l'accès au canal, bande passante 1 / N allouée même s'il n'y a qu'un seul nœud actif!





Contrôle d'accès au support (MAC)

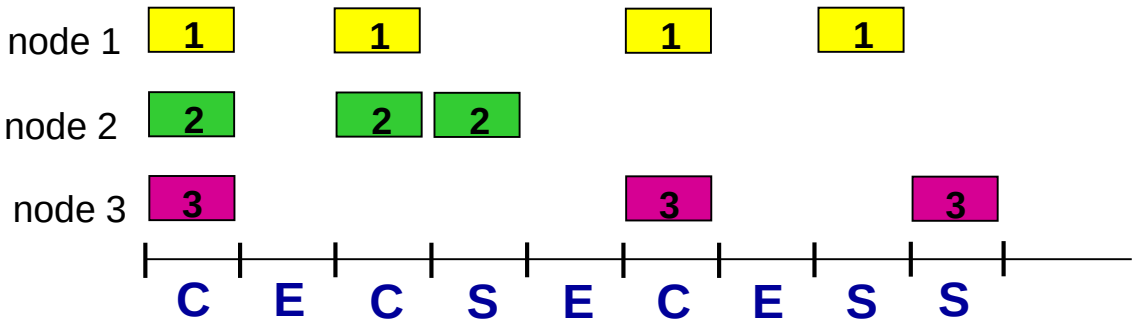
- **Deux alternatives** pour satisfaire nos desiderata

2. Soit accéder de manière aléatoire au canal

- canal non divisé: n'importe qui peut accéder n'importe quand
- ***efficace à faible charge*** : un seul nœud peut utiliser pleinement le canal
- ***charge élevée*** : surcharge due aux collisions
- quand le nœud a un paquet à envoyer
  - transmettre à plein débit du canal *R bps*
  - pas de coordination a priori entre les nœuds
- deux ou plusieurs nœuds émetteurs → « collision »
- le protocole MAC à accès aléatoire spécifie :
  - comment détecter les collisions
  - comment se récupérer des collisions (par exemple, via des retransmissions différées)
- exemples de protocoles MAC à accès aléatoire :
  - Pure ALOHA
  - *Slotted* ALOHA
  - CSMA, CSMA / CD, CSMA / CA

Contrôle d'accès au support (MAC)

- ***Slotted* ALOHA**
  - **Hypothèses** :
    - toutes les trames de la même taille
    - temps divisé en *slots* de taille égale (temps nécessaire pour transmettre une trame)
    - les nœuds ne commencent à transmettre qu'au début d'un *slot*
    - les nœuds sont synchronisés (horloge)
    - si 2 nœuds ou plus transmettent dans un *slot*, tous les nœuds détectent une collision
  - **Opération** :
    - quand le nœud obtient une nouvelle trame, il transmet dans le prochain *slot*
      - si aucune collision: le nœud peut envoyer une nouvelle trame dans le prochain *slot*
      - si collision: le nœud retransmet la trame dans chaque slot ultérieur avec probabilité *p* jusqu'au succès

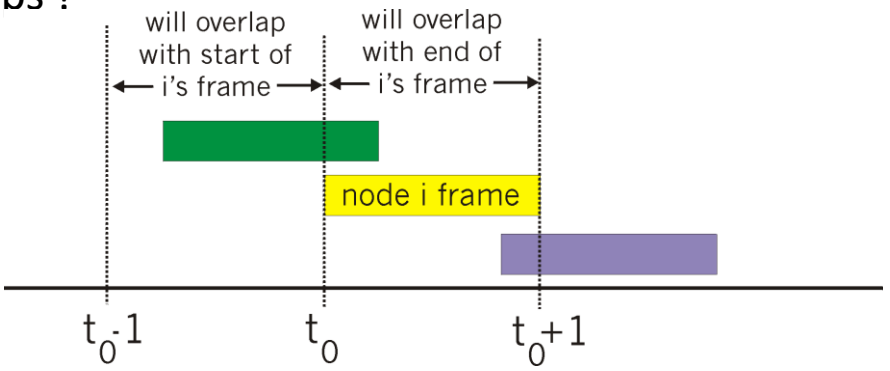


Contrôle d'accès au support (MAC)

- ***Slotted* ALOHA**
  - **Avantages** :
    - un seul nœud actif peut transmettre en continu au débit maximal du canal
    - très décentralisé: seuls les *slots* dans les nœuds doivent être synchronisés
    - simple
  - **Inconvénients**:
    - collisions, gaspillage de *slots, slots* inactifs
    - synchronisation d'horloge nécessaire
    - la **"zone de silence"** imposée aux autres pour être sûr que "la trame passe" est **au moins *la durée de l'émission d'une trame (un slot) t***
  - **Performance (hypothèse loi de Poisson)**
    - au mieux: canal utilisé pour transmissions sans collisions 37% de temps !

Contrôle d'accès au support (MAC)

- **Pure (*unslotted*) ALOHA**
  - plus simple, pas de synchronisation
  - si la trame arrive en premier, elle est transmise immédiatement, pas de slots
  - la probabilité de collision augmente : la trame envoyée à t_0 entre en collision avec d'autres trames envoyées dans l'intervalle $[t_0-1, t_0 + 1]$
  - donc, il faut imposer une **"zone de silence"** aux autres pour être sûr que "la trame passe" d'au moins deux fois la durée de l'émission d'une trame
    - **C'est le double qu'avant**
  - Performance divisée par deux: au mieux: canal utilisé pour transmissions sans collisions 18% de temps !



Contrôle d'accès au support (MAC)

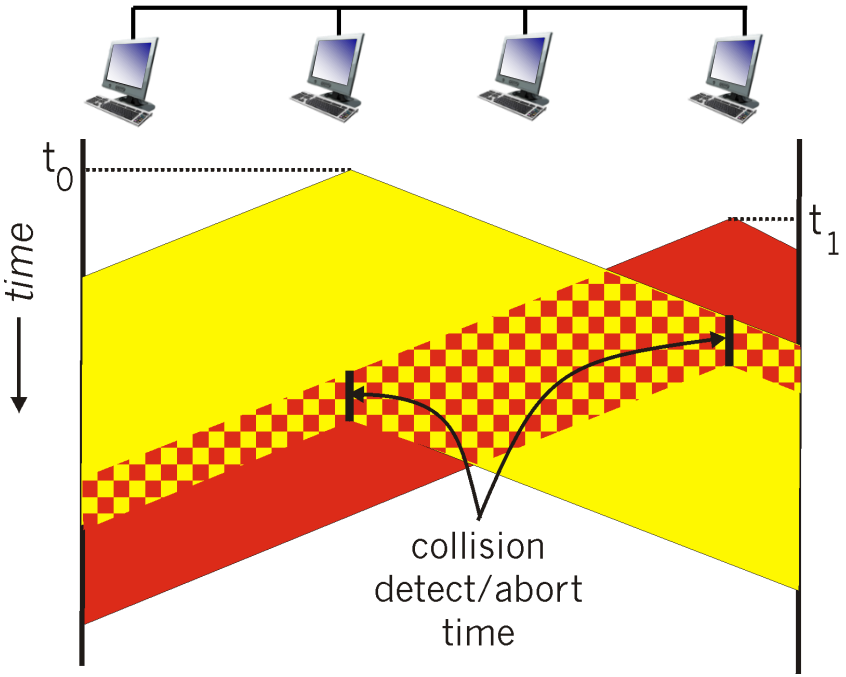
- **CSMA (*carrier sense multiple access*)**
  - ***écouter avant d'émettre*** **:**
    - si le canal détecté est inactif: transmettre la trame entière
    - si le canal détecté est occupé, différer la transmission
  - Analogie humaine: n'interrompez pas les autres!
  - Comme pour ALOHA, il n'y a pas de contrôle centralisé pour accéder au canal, ***MAIS, maintenant il y de la politesse !***
  - Des collisions peuvent encore se produire: le délai de propagation signifie que deux nœuds ne peuvent pas entendre la transmission l'un de l'autre.
  - **Collision**: perte totale de temps de transmission de paquets
    - la distance et le délai de propagation jouent un rôle dans la détermination de la probabilité de collision

Contrôle d'accès au support (MAC)

- **CSMA avec CD (*collision detection*)**
  - Afin de réduire plus encore, la bande passante gâchée par les collisions, il faut ajouter une autre caractéristique : « ***écouter pendant la transmission*** ».
    - on devient plus poli !!!
    - collisions détectées dans un délai plus court qu'avant: on n'attend pas *T(slotted ALOHA)* ou *2T (ALOHA)*
    - transmissions en collision interrompues, réduisant ainsi le gaspillage de canaux
  - Détection de collision:
    - facile dans les réseaux locaux câblés: mesurer l'intensité du signal, comparer les signaux transmis et reçus
    - difficile dans les LAN sans fil (WiFi): la force du signal reçu est dépassée par la force de la transmission locale → Ici CSMA/CA (Congestion Avoidance), on essaie d'éviter absolument les collisions parce qu'on ne peut pas les détecter !!!
  - Performance peut monter jusqu'à 100% en dépendant du délai de propagation et de la durée de transmission d'une trame

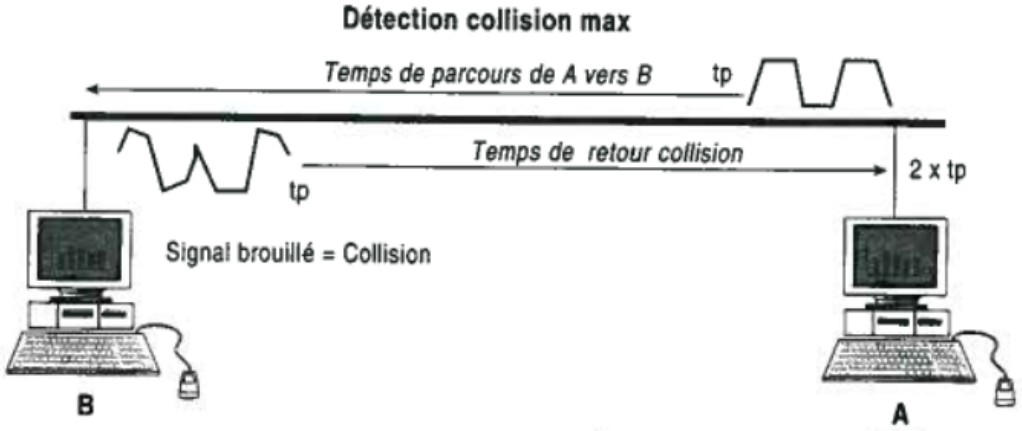
Contrôle d'accès au support (MAC)

- ***Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection*** **(CSMA/CD) :**
  - Chaque hôte est à l'écoute et doit attendre que le media soit libre («silence media») avant de pouvoir émettre.
  - Quand le canal est libre, un hôte peut émettre.
  - Quand 2 hôtes tentent d'émettre simultanément, une **collision** se produit. Dans cette situation, les 2 hôtes perçoivent la collision et envoient un signal de collision qui empêche l'émission pendant une durée aléatoire. tiré dans un intervalle déterminé par ***l'algorithme de Back-off***:
    - après la *m-ième* collision, l'hôte choisit *K* au hasard parmi {0,1,2,…, 2^{m-1}}, et il attend K fois 512 bits (64 bytes)
    - intervalle de Back-off plus long avec plus de collisions

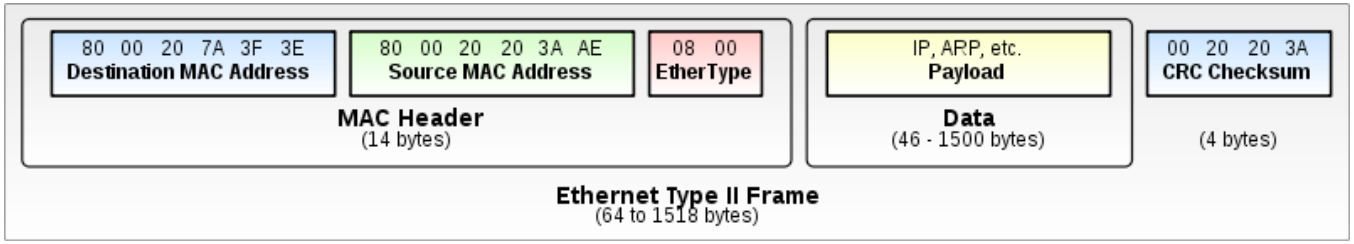


Contrôle d'accès au support (MAC)

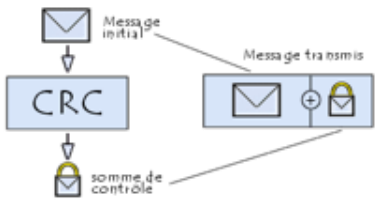
- ***Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection*** **(CSMA/CD) :**
  - La station A émet au temps T_A. Supposons que B émette juste avant que le signal de A lui parvienne. Le signal brouillé revient vers A.
  - Pour que A « voit » le brouillage, il faut qu'il émette encore quand le signal de retour l'atteindra :
    - Soit *2 fois le temps t_p de propagation* (Aller/Retour) = 34 µs pour une distance max. de **2.5 km**
    - Avec une marge de sécurité, cela donne 51,2µs → *soit une trame minimal de **64 octets** à **10Mb/s*** afin de pouvoir détecter des collisions



Format de trame Ethernet

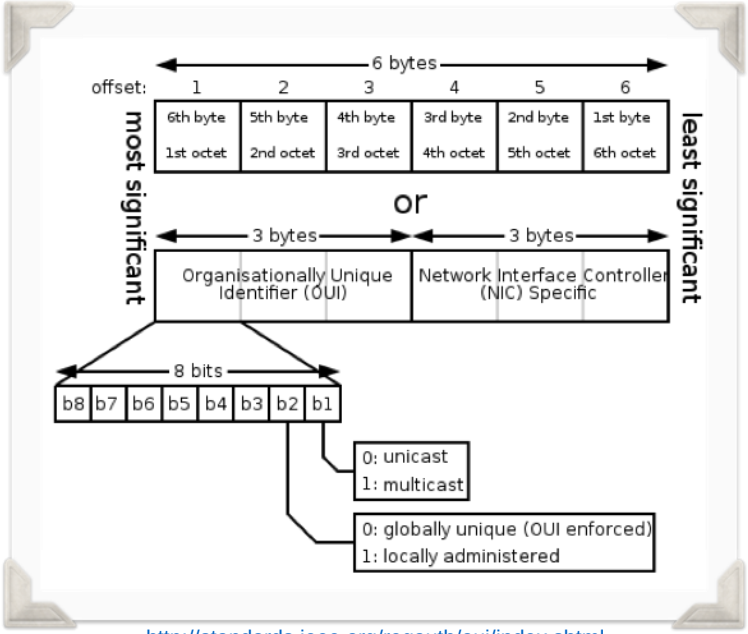


- Chaque *paquet couche réseaux* est encapsulé dans une *trame Ethernet* (ou fragmenté au besoin) :
  - **Préambule :** 7 octets avec patron 10101010 suivi d'un avec 10101011 = *start of frame delimiter*
  - **Adresses destination, Adresse source** sur 2x6 octets
  - **Type paquet couche réseaux** : 0x0800 IPv4, 0x86DD ipv6, 0x0806 arp, 0x8035 rarp
  - **CRC**, ***Cyclic redundancy check*** : puissant code de détection d'erreurs
    - CRC32 de polynôme générateur :
      $X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$
    - On calcule le reste de la division Euclidienne entre les données et le CRC32.
- Remplissage PAD : trame 64 octets min (hors préambule)
- Taille max: 1518 octets



Adresses MAC

- Adresse sur 6 octets en hexadécimal (48 bits), p. ex.: 00:22:41:36:00:41
- Octet → hexadécimal: (0x5E = 0101 1110)
- Brûlés dans NIC (identifiant physique de l'interface)
- Multicast: adresses dest. débute par 1
- Broadcast: adresses dest. avec tous bits à 1

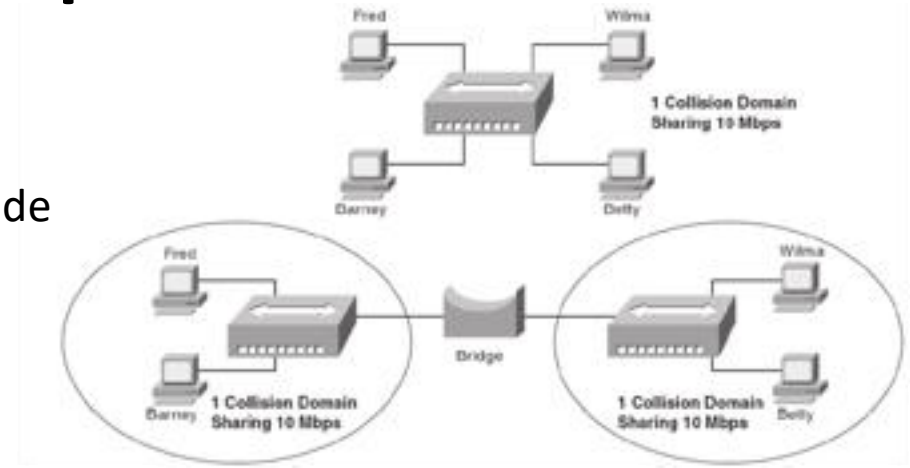


http://standards.ieee.org/regauth/oui/index.shtml

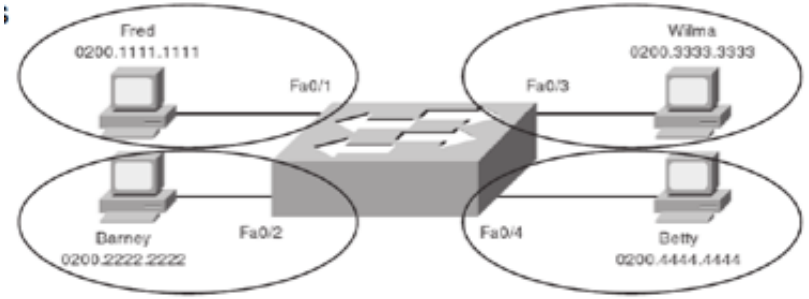
- Utilisés «localement » pour amener une trame d'une interface à une autre interface physique connectée (dans le même sous-réseau IP)
- Fabricant achète une partie de la plage de l'adressage MAC (pour assurer l'unicité), p. ex. Apple 00:22:41:xx:yy:zz

Types de réseaux couche liaison selon dispositif

- **Réseau concentré / ponté**
  - Avec hubs / ponts (*bridges*)
  - *Hub* : ne préserve pas la bande passante
  - *Bridge*: préserve la bande passante



- **Réseau commuté**
  - Avec commutateurs (*switches*)
  - *Switch* : préserve la bande passante
  - Et, *en plus*, les trames sont *commutées*



Fonctionnement hub

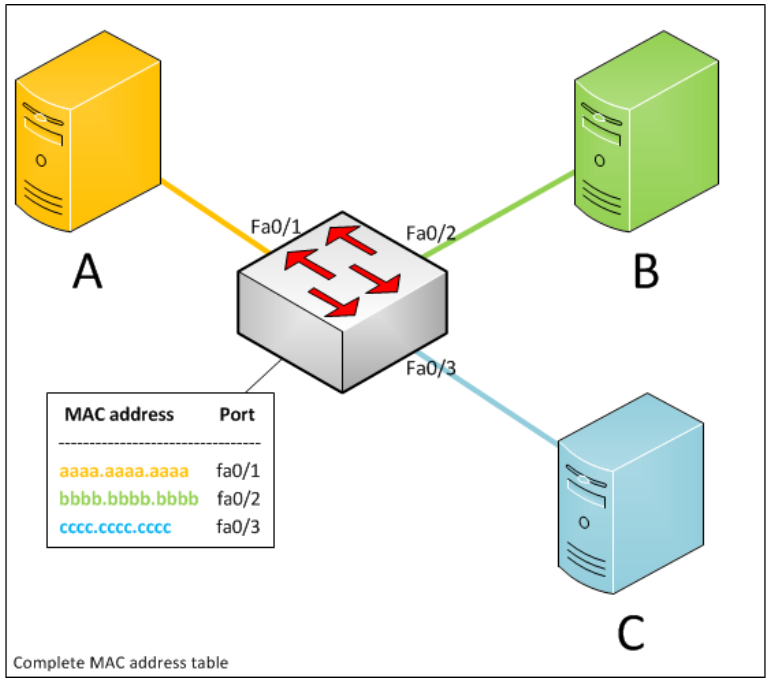
- Quand un paquet est reçu, il est propagé sur toutes les interfaces sauf celle de l'émetteur.
- Hub ne délimite ni les *domaines de collision* ni les *domaines de broadcast* :
  - **Domaine de collision** *est une région du réseau au sein de laquelle les hôtes partagent l'accès au media.*
  - ***Domaine de broadcast*** *: aire logique du réseau où tout ordinateur connecté peut directement transmettre à tous les autres ordinateurs du même réseau, sans devoir passer par un routeur.*
- Permet à la carte réseau d'un hôte d'accepter tous les paquets qu'elle reçoit, même s'ils ne lui sont pas destinés (mode de promiscuité).
- Détection du mode de promiscuité:
  - augmentation de la charge de l'hôte qui traite tous les paquets et
  - augmente la latence du réseau
  - détection par `detectpromisc`

Du hub au switch

- Réseau avec beaucoup d'hôtes, problèmes de performance avec hubs:
  - **disponibilité**: partage de la bande passante; un hôte peut monopoliser tout le trafic (gros transfert)
  - **latence**: (temps nécessaire à un paquet pour atteindre sa destination). *Avec des hubs on attend une opportunité de transmission pour ne pas causer de collision (RAPPELER MAC)*. La latence croît en fonction du nombre d'hôtes du réseau.
  - **défaillance**: hub plus sensible aux pannes ou aux mauvaises configuration de la vitesse de transmission
- Un *switch* (commutateur) résout ces problèmes en délimitant les *domaines de collision*
  - Chaque hôte connecté dispose de toute la bande passante.
  - Un paquet qui arrive sur un port du switch n'est retransmis que sur le port auquel le destinataire est connecté
  - Signaux de collision non retransmis par les switches

Fonctionnement switch

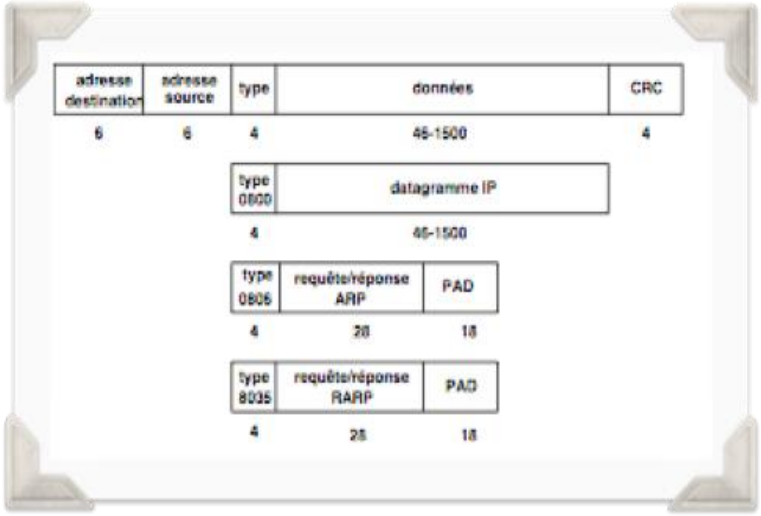
- Un paquet qui arrive dans le switch est mis dans un buffer. L'adresse MAC de destination du paquet est lue et comparée à la liste des MAC connues rangées dans la **table de lookup**.
- 3 modes d'acheminement:
  - ***cut through***: lecture des 6 octets MAC dest. et routage direct sans traitement vers le port (interface) du destinataire
  - ***store and forward***: mise en mémoire et traitement du paquet avant son acheminement (rejeter les paquets mal formés, gérer les messages de collision)
  - ***fragment free***: analogue au *cut through* mais lit les 64 premiers octets (longueur min de la trame) avant le routage. (cela limite les erreurs de collision qui arrivent souvent sur les 64 premiers octets)
- **Le mode le plus utilisé est le *store and forward*.**



https://cdynamicprogramming.blogspot.fr/p/mac-learning.html

Protocole ARP/RARP [RFC 826]

- *Address Resolution Protocol* (ARP) [RFC 826] sert à trouver l'adresse matérielle correspondant à l'IP de destination
- La version *reverse* (RARP) sert à trouver l'adresse logique (IP) correspondant à l'adresse physique (MAC)
- Protocoles qui permettent d'assurer la correspondance entre adresse IP (logique) et adresse physique (MAC)
- Assure la traduction d'adresses de niveau 3 (IP) en adresses de niveau 2 (MAC) (n° OSI)
- Chaque paquet (R)ARP est encapsulé dans une trame Ethernet
  - RFC894 précise l'encapsulation IP dans eth.
  - ARP : Ethertype 0x0806 dans la trame ethernet
  - RARP: Ethertype 0x0835 dans la trame ethernet



Protocole ARP/RARP [RFC 826]

- **Tableau ARP**: chaque nœud IP (hôte, routeur) sur le réseau local maintient une table
  - Mappages d'adresses IP / MAC pour certains nœuds de réseau local (au min, son propre mapping):

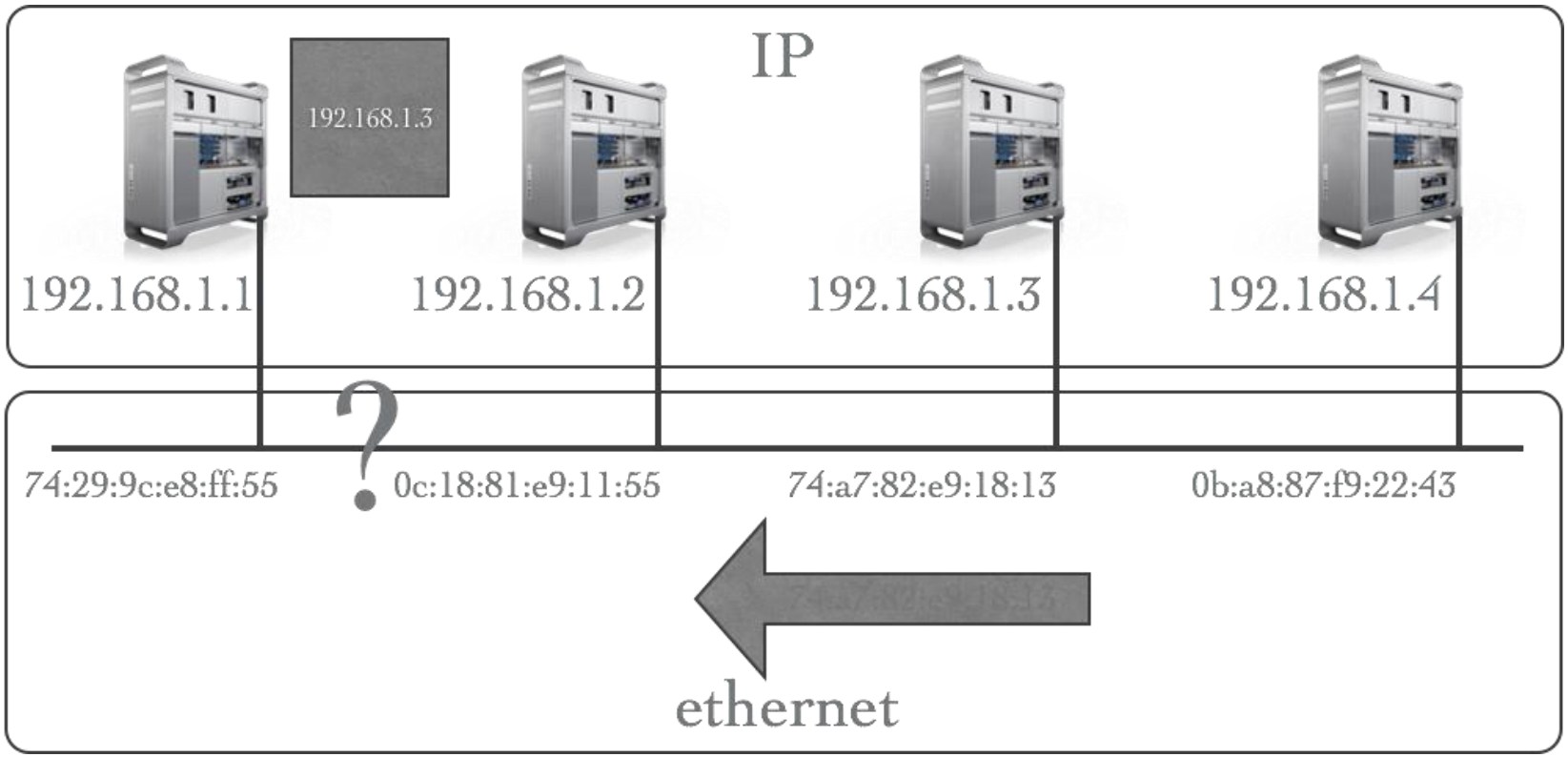
    `<Adresse IP; Adresse Mac; TTL>`
  - TTL (Time To Live): temps après lequel le mappage d'adresses sera oublié (généralement 20 min)
  - Commande `arp -a`

```
Ramons-MacBook-Air:~ raparicio$ arp -a
? (192.168.1.254) at f4:ca:e5:44:79:d1 on en0 ifscope [ethernet]
```

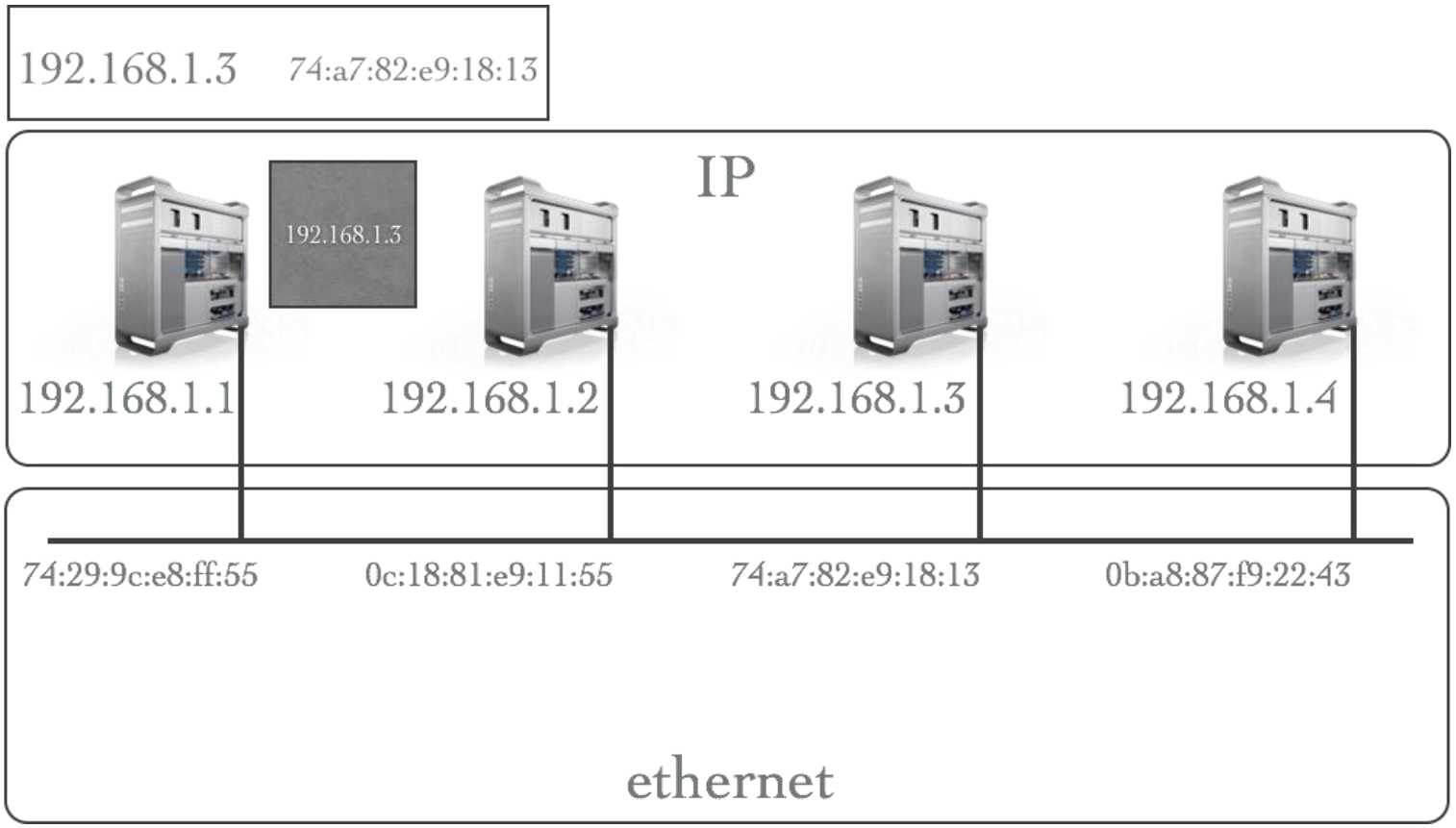
Protocole ARP/RARP [RFC 826]

- **Protocole ARP** :
  - A veut envoyer un datagramme à B
    - L'adresse MAC de B ne figure pas dans la table ARP de A.
  - A diffuse un paquet de requête ARP, contenant l'adresse IP de B
    - adresse MAC de destination = FF-FF-FF-FF-FF-FF
    - tous les nœuds du réseau local reçoivent la requête ARP
  - Evidemment, B reçoit le paquet ARP, répond à A avec son adresse MAC (B)
    - trame de réponse envoyée à l'adresse MAC de A de façon unicast
  - A met en cache la paire d'adresses IP-MAC dans sa table ARP jusqu'à ce que les informations deviennent anciennes (timeout dépassé)
    - Les informations expirent (disparaissent) sauf si actualisées
  - Aussi, des messages ARP gratuits (*gratuitous ARP*) sont envoyées au démarrage de certains systèmes d'exploitation pour annoncer aux machines sa paire d'adresses IP-MAC
  - ARP est «plug-and-play» :
    - Les nœuds créent leurs tables ARP sans intervention de l'administrateur du réseau.

Protocole ARP/RARP [RFC 826]

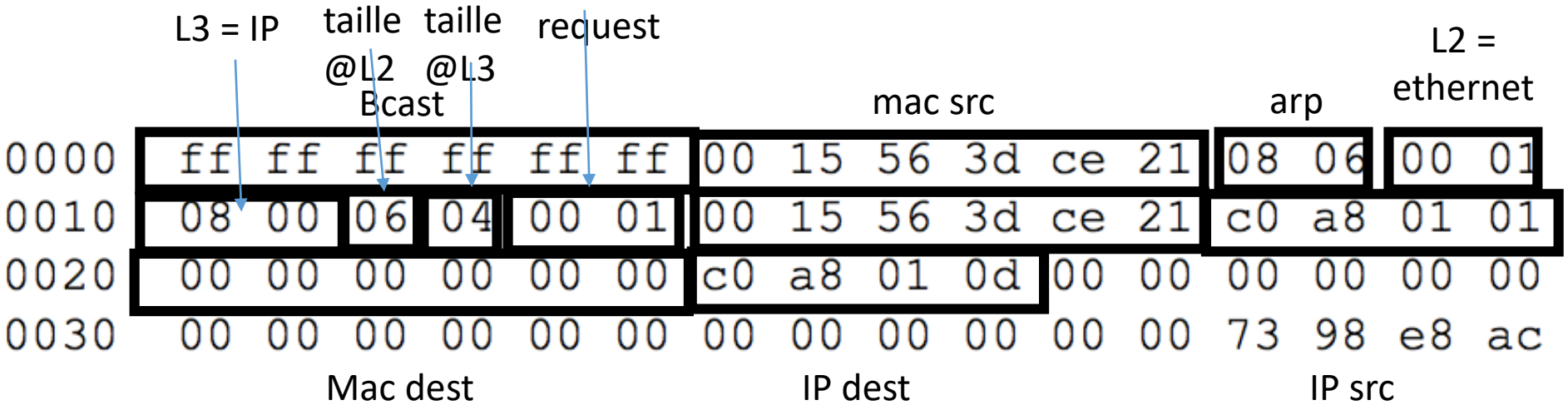


Protocole ARP/RARP [RFC 826]



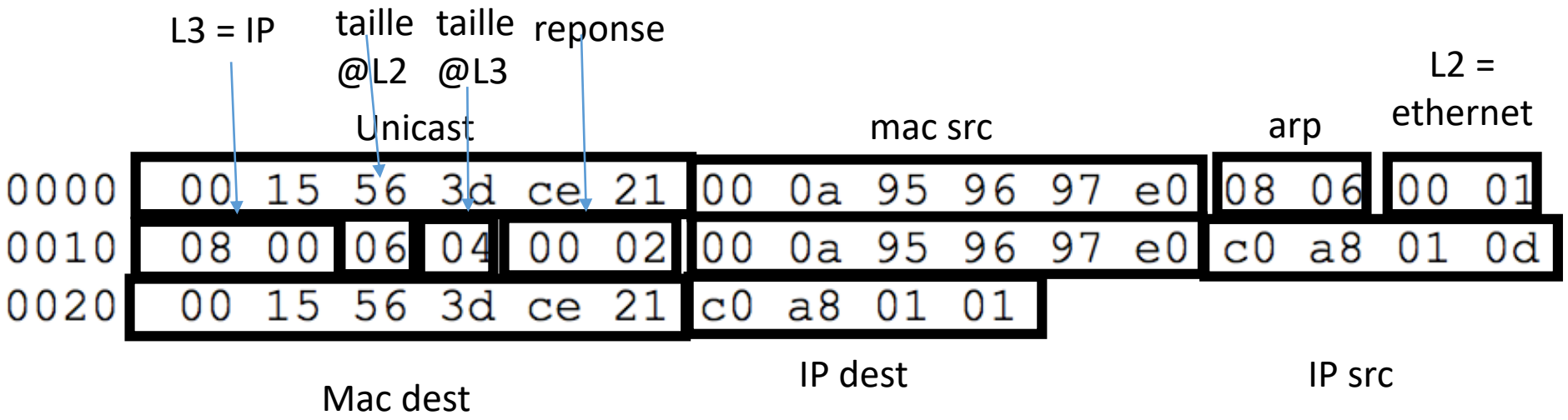
Protocole ARP/RARP [RFC 826]

- Trame ARP-Requête: Broadcast : on ne connaît pas encore la destination



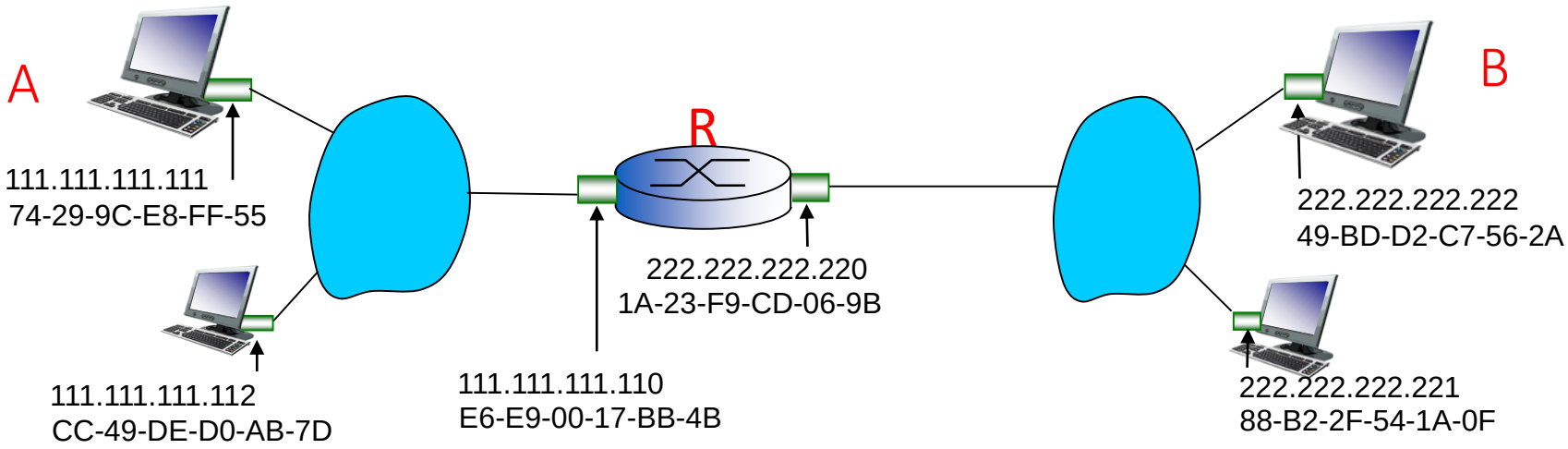
Protocole ARP/RARP [RFC 826]

❖ Trame ARP – Réponse: Unicast : On connaît la machine qui avait demandé en premier lieu



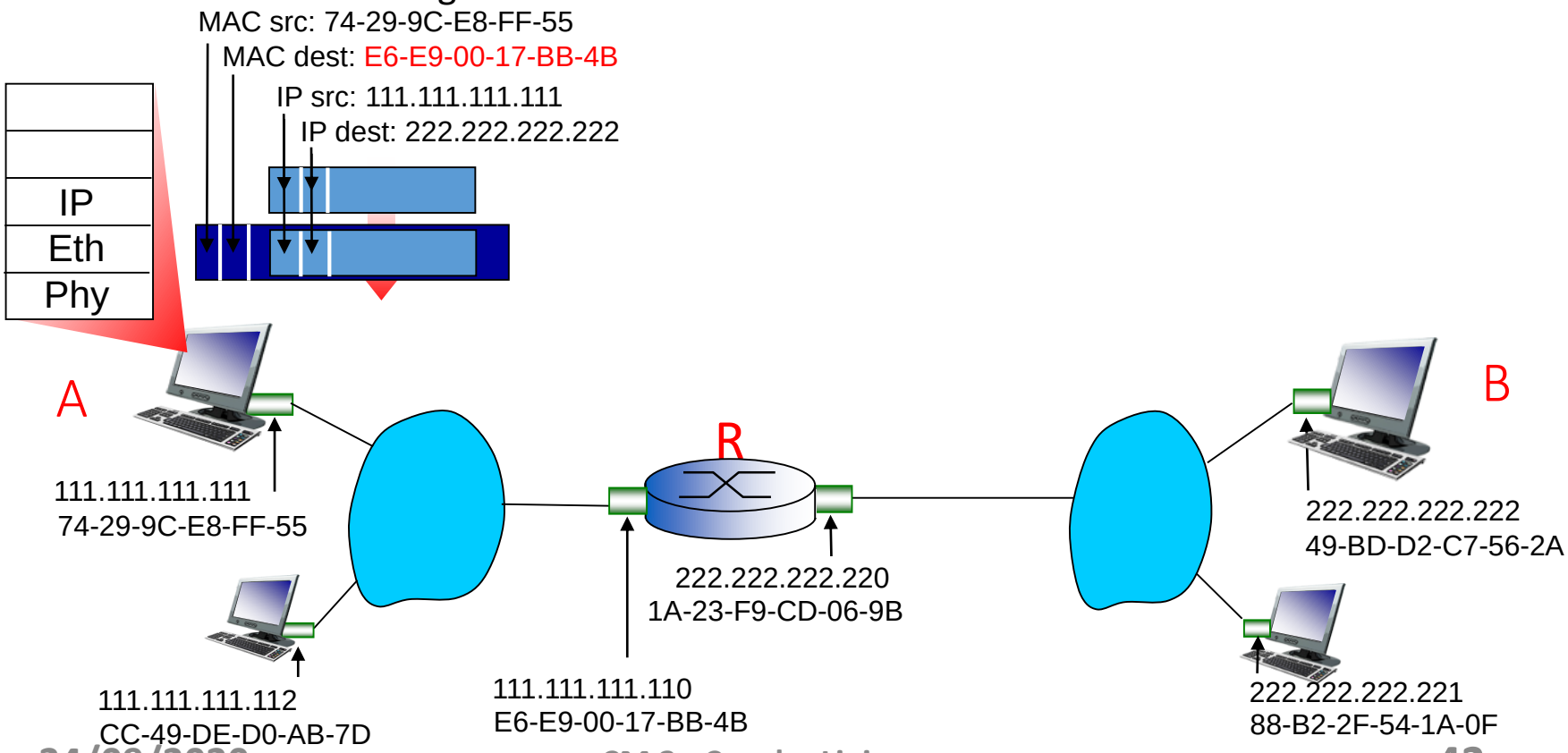
Procédure pas à pas: envoyer un datagramme de A à B via R

- se concentrer sur l'adressage - au niveau IP (datagramme) et MAC (trame)
- supposer que A connaît l'adresse IP de B
- supposons que A connaisse l'adresse IP du premier routeur de saut, R (comment ?)
- supposer que l'adresse MAC de R est connue (comment ?)



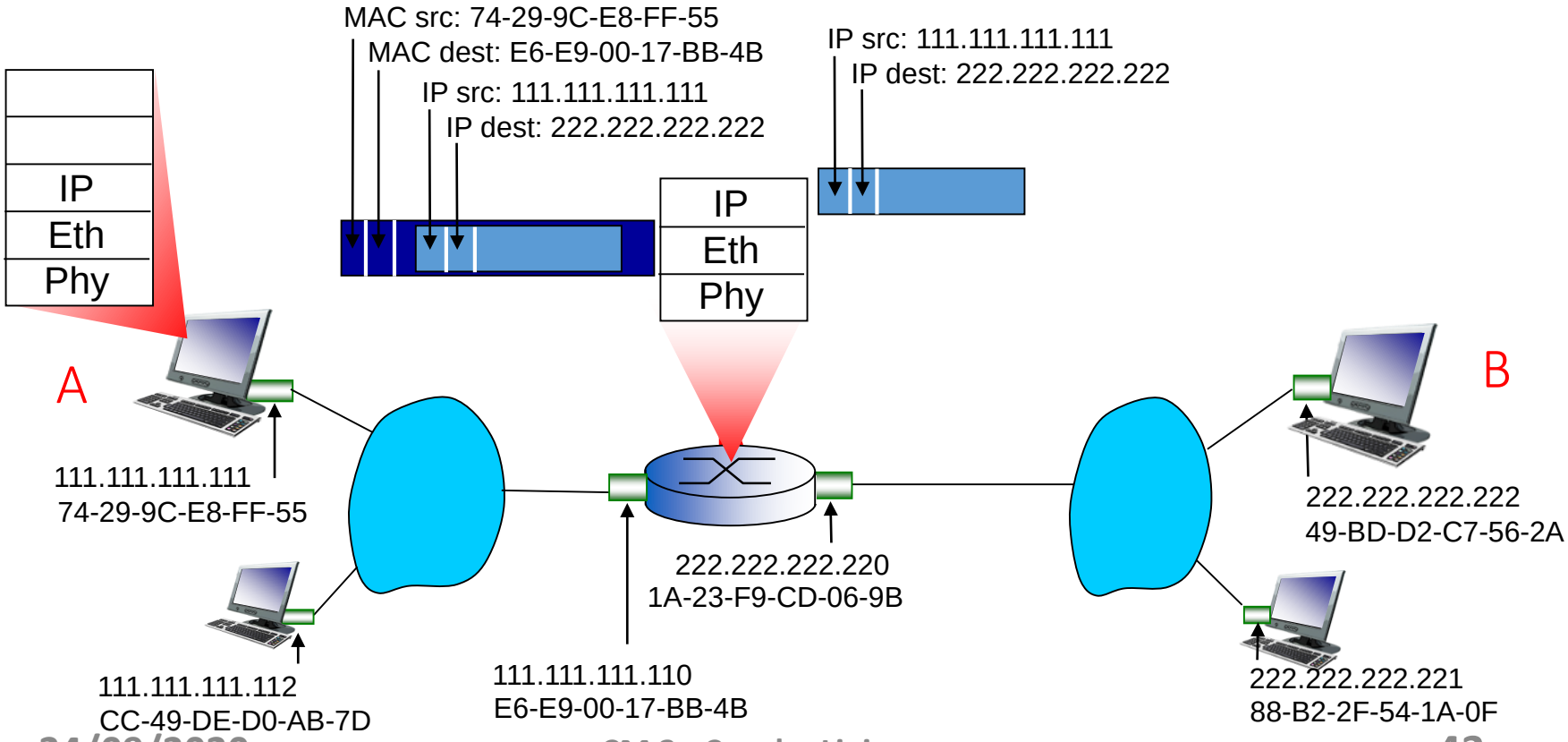
Procédure pas à pas: envoyer un datagramme de A à B via R

- A crée un datagramme IP avec les adresses IP <source A, dest. B >
- A crée une trame de couche liaison avec l'adresse MAC de R comme destination, la trame contient le datagramme IP de A à B



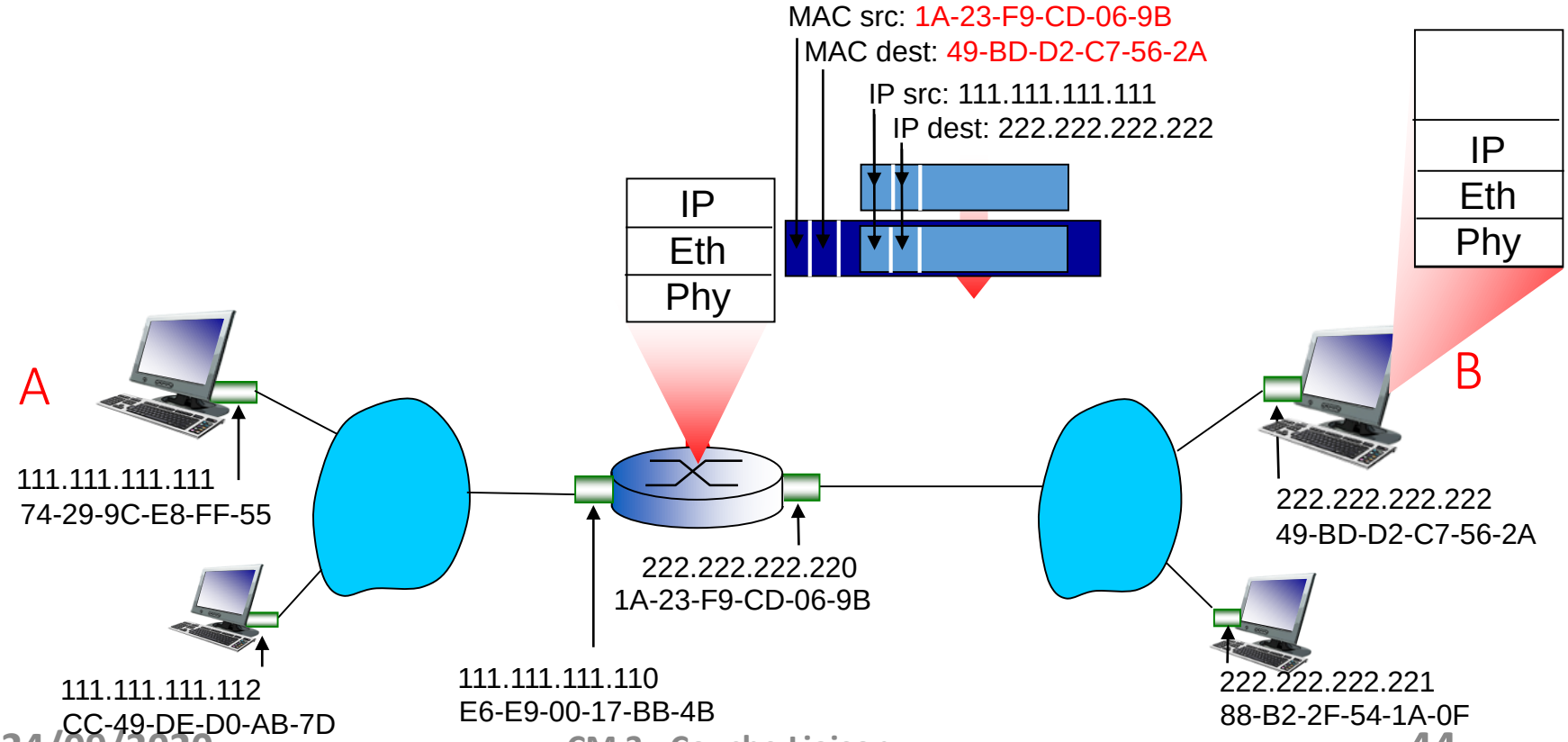
Procédure pas à pas: envoyer un datagramme de A à B via R

- Trame envoyée de A à R
- Trame reçue en R, datagramme enlevé, transmis à la couche IP



Procédure pas à pas: envoyer un datagramme de A à B via R

- R transmet le datagramme avec les adresses IP <source A, la destination B>
- R crée une trame de couche liaison avec l'adresse MAC de B comme destination, la trame contient le datagramme IP de A à B encore une fois



Procédure pas à pas: envoyer un datagramme de A à B via R

- R transmet le datagramme avec les adresses IP <source A, la destination B>
- R crée une trame de couche liaison avec l'adresse MAC de B comme destination, la trame contient le datagramme IP de A à B encore une fois