

Chapitre 5 – Couche Liaison et réseaux locaux (LAN)

Adapté du livre Computer Networking: A Top-Down Approach, 6th ed., J.F. Kurose and K.W. Ross
© All material copyright 1996-2013, J.F. Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved

1

Chapitre 5: Couche Liaison, LANs

Objectifs:

- comprendre les principes derrière les services de la Couche Liaison :
 - détection d'erreur, correction
 - partage d'un canal de diffusion : accès multiple
 - adressage de Couche Liaison
 - réseaux locaux : Ethernet, VLAN
- instantiation, implémentation de différentes technologies de Couche Liaison

Link Layer and LANs 6-2

2

Couche Liaison, LANs: Plan

5.1 Introduction, services

5.2 Détection d'erreur, correction

5.3 Protocoles d'accès multiples

5.4 LAN

- Adressage, ARP
- Ethernet
- Commutateurs
- VLAN

5.5 Une journée dans la vie d'une demande Web

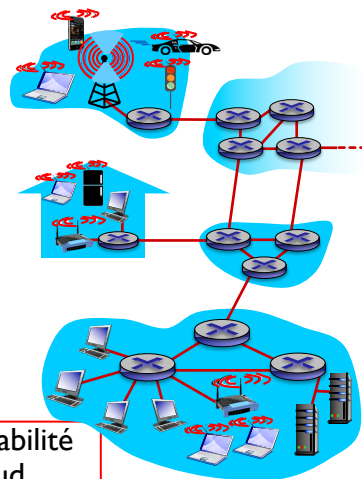
Link Layer and LANs 6-3

3

Couche Liaison: introduction

Terminologie:

- hôtes et routeurs : **noeuds**
- canaux de communication qui connectent les noeuds adjacents le long du chemin de communication: **liens**
 - lien filaire
 - lien sans fil
 - lien local (LAN)
- paquet de couche 2 : **trame**, encapsule le datagramme



Couche Liaison de données a la responsabilité de transfert du datagramme d'un noeud au *noeud physiquement adjacent* sur un lien

Link Layer and LANs 6-4

4

Couche Liaison: contexte

- datagramme transféré par différents protocoles de liaison sur différentes liaisons :
 - par exemple, *Ethernet* sur la première liaison, *Frame Relay* sur les liaisons intermédiaires, *802.11* sur la dernière liaison
 - chaque protocole de liaison fournit des services différents
 - par exemple, peut ou pas fournir le RDT sur le lien
- analogie de transport :*
- voyage de Princeton à Lausanne
 - Limousine : Princeton à JFK
 - Avion : JFK à Genève
 - Train : Genève à Lausanne
 - touriste = **datagramme**
 - segment de transport = **lien de communication**
 - mode de transport = **protocole de Couche Liaison**
 - agent de voyage = **algorithme d'acheminement**

Link Layer and LANs 6-5

5

Services de la Couche Liaison

- **Trame**, accès au lien :
 - encapsuler un datagramme dans une trame, en ajoutant un en-tête, une fin du trame
 - règle l'accès au canal si support partagé
 - adresses MAC utilisées dans les en-têtes de trame pour identifier la source, la destination
 - différent de l'adresse IP !
- **Livraison fiable entre les nœuds adjacents**
 - nous avons déjà appris à le faire (chapitre précédent) !
 - rarement utilisé sur les liaisons à faible erreur de bit (fibre, paire torsadée)
 - liens sans fil : taux d'erreur élevé

Link Layer and LANs 6-6

6

Services de Couche Liaison (suite)

- **Contrôle de flux :**
 - rythme entre les nœuds d'envoi et de réception
- **Détection d'erreur :**
 - erreurs causées par l'atténuation du signal, le bruit.
 - le récepteur détecte la présence d'erreurs :
 - signale l'expéditeur pour la retransmission ou abandonne la trame
- **Correction des erreurs :**
 - le récepteur identifie *et corrige* les erreurs de bits sans recourir à la retransmission
- **Semi-duplex et full-duplex**
 - en semi-duplex, les nœuds situés aux deux extrémités du lien peuvent transmettre, mais pas en même temps

Link Layer and LANs 6-7

7

Couche Liaison, LANs: Plan

5.1 Introduction, services

5.2 Détection d'erreur,
correction

5.3 Protocoles d'accès
multiples

5.4 LAN

- adressage, ARP
- Ethernet
- commutateurs
- VLAN

5.5 Une journée dans la vie
d'une demande Web

Link Layer and LANs 6-8

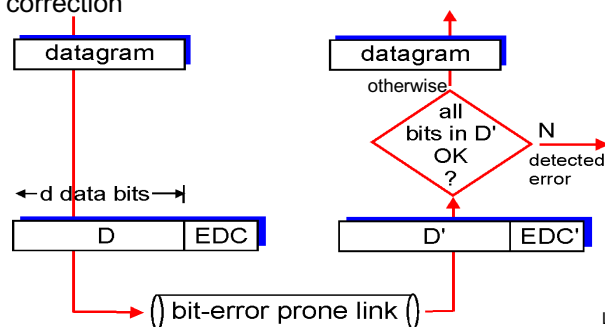
8

Détection d'erreur

EDC= Error Detection and Correction bits (redondance)

D = Données protégées par un contrôle d'erreur, peuvent inclure des champs d'en-tête

- La détection d'erreur n'est pas fiable à 100% !
 - protocole peut manquer quelques erreurs, mais rarement
 - un champ EDC plus grand permet une meilleure détection et correction



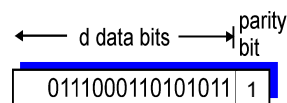
Link Layer and LANs 6-9

9

Vérification de la parité

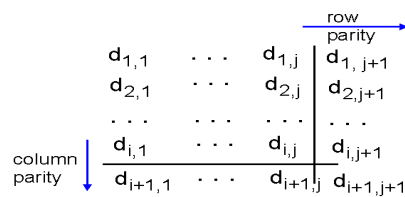
Bit Parité unique :

- déetect erreurs de bit simple



Parité binaire bidimensionnelle :

- déetecter et corriger les erreurs sur 1 seul bit



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

no errors

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

parity error
correctable single bit error

Link Layer and LANs 6-10

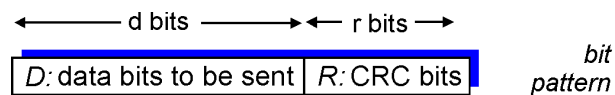
10

TD- exo I

11

Contrôle de redondance cyclique

- Code de détection d'erreurs plus puissant
- Affichez les bits de données, **D**, sous forme de nombre binaire
- Choisissez le pattern $r+1$ bit (générateur), **G**
- Objectif : choisir r bits CRC, **R**, tel que :
 - $\langle D, R \rangle$ divisible par G (modulo 2)
 - le destinataire connaît G , divise $\langle D, R \rangle$ par G . On obtient un reste. Si reste non nul, erreur détectée !
 - peut détecter toutes les erreurs de rafales inférieures à $r+1$ bits
- largement utilisé dans la pratique (Ethernet, WiFi 802.11, ATM)



$$D * 2^r \text{ XOR } R$$

mathematical formula

Link Layer and LANs 6-12

12

CRC - exemple

On veut :

$$D2^r \text{ XOR } R = nG$$

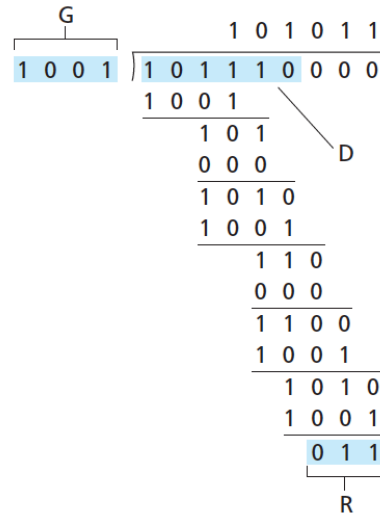
Equivalent :

$$D2^r = nG \text{ XOR } R$$

equivalent:

si on divise $D2^r$ par G , on veut R qui satisfait :

$$R = \text{reste} \left[\frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$



Link Layer and LANs 6-13

13

TD- exo2

14

Couche Liaison, LANs : Plan

- 5.1 Introduction, services
- 5.2 Détection d'erreur, correction
- 5.3 Protocoles d'accès multiples
- 5.4 LAN
 - adressage, ARP
 - Ethernet
 - commutateurs
 - VLAN
- 5.5 Une journée dans la vie d'une demande Web

Link Layer and LANs 6-15

15

Liaisons d'accès multiples, protocoles

deux types de "liens" :

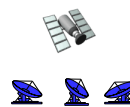
- point à point (unicast)
 - PPP pour l'accès modem commuté
 - lien point à point entre commutateur Ethernet, hôte
- *diffusion/broadcast (média partagé)*
 - Ethernet à l'ancienne (hub)
 - Réseau local sans fil 802.11



shared wire (e.g.,
cabled Ethernet)



shared RF
(e.g., 802.11 WiFi)



shared RF
(satellite)



humans at a
cocktail party
(shared air, acoustical)

Link Layer and LANs 6-16

16

Protocoles d'accès multiples

- canal de diffusion partagé unique
- deux ou plusieurs transmissions simultanées par nœuds : brouillage
 - *collision* si le nœud reçoit deux signaux ou + en même temps

Protocole d'accès multiple

- algorithme distribué qui détermine la manière dont les nœuds partagent le canal, c'est-à-dire qui détermine quand le nœud peut transmettre
- la communication sur le partage de canal doit utiliser le canal lui-même !
 - pas de canal hors bande pour la coordination

Link Layer and LANs 6-17

17

Protocole d'accès multiple idéal

Etant donné : canal de radio diffusion à débit R bps

On souhaite :

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

Link Layer and LANs 6-18

18

Protocoles MAC : taxonomie

trois grandes classes :

- **partitionnement des canaux**
 - diviser le canal en "morceaux" plus petits (temps, fréquence, code)
 - attribuer un morceau à un nœud pour une utilisation exclusive
- **accès aléatoire**
 - canal non divisé, autoriser les collisions
 - «Récupérer» après collisions
- **« tour de rôle »**
 - les nœuds se relaient, mais les nœuds avec plus de données à envoyer peuvent prendre des tours plus longs

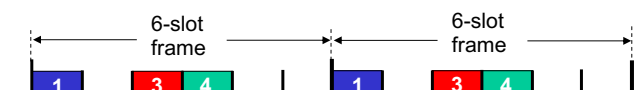
Link Layer and LANs 6-19

19

Protocoles partitionnement de canal : TDMA

TDMA : time division multiple accès

- accès au canal à tour de rôle
- chaque station obtient un créneau de longueur fixe (longueur = temps de transmission du paquet) à chaque tour
- les emplacements inutilisés deviennent inactifs
- Exemple : réseau local à 6 stations, 1,3,4 ont des paquets à envoyer, créneaux 2,5,6 inactifs



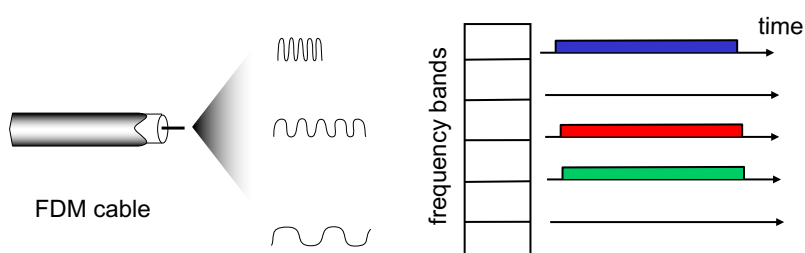
Link Layer and LANs 6-20

20

Protocoles partitionnement de canal : FDMA

FDMA : frequency division multiple access

- spectre de canaux divisé en bandes de fréquences
- bande assignée à chaque station
- le temps de transmission non utilisé dans les bandes de fréquence devient inactif
- Exemple : réseau local à 6 stations, 1,3,4 ont un paquet à envoyer, bandes de fréquence 2,5,6 inactif



Link Layer and LANs 6-21

21

Protocoles d'accès aléatoires

- quand le noeud a un paquet à envoyer
 - transmettre à plein débit R.
 - pas de coordination à *a priori* entre les nœuds
- deux ou plusieurs émetteurs → «collision»,
- Le protocole **MAC à accès aléatoire** spécifie :
 - comment détecter les collisions
 - comment se remettre d'une collision (par exemple, via des retransmissions différées)
- exemples de protocoles MAC à accès aléatoire :
 - Slotted ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Link Layer and LANs 6-22

22

Slotted ALOHA

hypothèses :

- les trames de même taille
- temps divisé en intervalles de taille égale *slot* (temps nécessaire pour transmettre une trame)
- les nœuds commencent à ne transmettre qu'au début du slot
- les nœuds sont synchronisés
- si 2 nœuds ou plus transmettent dans un créneau, tous les nœuds détectent une collision

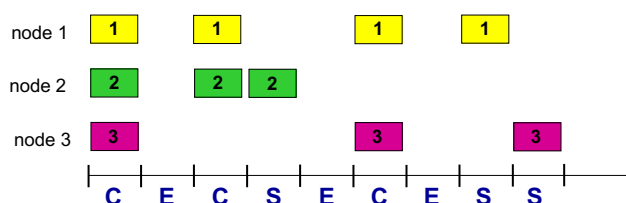
Opération :

- quand le nœud obtient une nouvelle trame, transmet dans le prochain emplacement (slot)
 - *si aucune collision* : le nœud peut envoyer une nouvelle trame dans le prochain slot
 - *en cas de collision* : le nœud retransmet la trame dans chaque intervalle ultérieur avec probabilité p jusqu'au succès

Link Layer and LANs 6-23

23

Slotted ALOHA



Pros :

- seul nœud actif peut transmettre en continu au débit maximal du canal
- très décentralisé : seuls les slots dans les nœuds doivent être synchronisés
- simple

Cons :

- collisions, gaspillage de slot
- slots inactifs
- les nœuds peuvent être capables de détecter une collision plus rapidement que le temps pour transmettre un paquet
- synchronisation d'horloge

Link Layer and LANs 6-24

24

Slotted ALOHA : efficacité

Efficacité : fraction à long terme de slots réussis (beaucoup de nœuds, tous avec beaucoup de trames à envoyer)

- Supposons : N nœuds avec beaucoup de trames à envoyer, chacun émet dans un créneau avec une probabilité p
- prob que le nœud donné ait du succès dans un slot = $p(1-p)^{N-1}$
- prob que *tout* nœud a un succès = $Np(1-p)^{N-1}$

- efficacité maximale : trouver p^* qui maximise $Np(1-p)^{N-1}$
- pour beaucoup de nœuds, prendre la limite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ lorsque N tend vers l'infini, cela donne :
max efficacité = $1/e = .37$

au mieux: canal utilisé pour transmission utile 37% de temps!

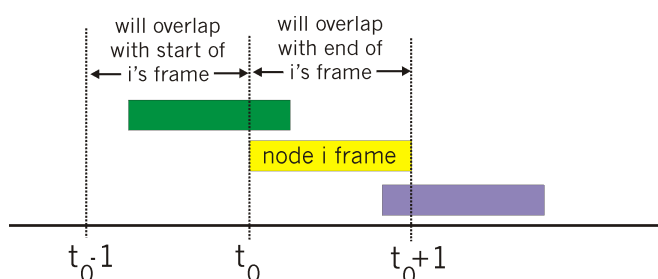


Link Layer and LANs 6-25

25

Pure (unslotted) ALOHA

- Aloha : plus simple, pas de synchronisation
- quand la trame arrive en premier
 - transmettre immédiatement
- probabilité de collision augmente :
- la trame envoyée à t_0 entre en collision avec d'autres trames envoyées dans $[t_0-1, t_0+1]$



Link Layer and LANs 6-26

26

Pure ALOHA efficacité

$$P(\text{success by given node}) = P(\text{node transmits}) \cdot \\ P(\text{no other node transmits in } [t_0-1, t_0]) \cdot \\ P(\text{no other node transmits in } [t_0, t_0+1])$$

$$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1} \\ = p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$$

... choosing optimum p and then letting $n \rightarrow \infty$

$$= 1/(2e) = .18$$

encore pire que slotted Aloha !

Link Layer and LANs 6-27

27

CSMA (carrier sense multiple access)

CSMA : écouter avant de transmettre :

- Si le canal détecté inactive : transmet la trame
- Si le canal détecté occupé : différer la transmission

- Analogie humaine : n'interrompez pas les autres !

Link Layer and LANs 6-28

28

CSMA collisions

- collisions *peuvent encore se produire* : délai de propagation fait 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



Link Layer and LANs 6-29

29

CSMA/CD (collision detection)

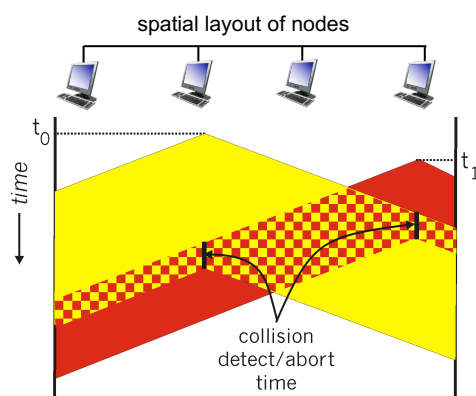
CSMA/CD : détection de porteuse, report de tx comme dans CSMA

- collisions *détectées* dans un délai court
- les transmissions en collision interrompues, réduisant ainsi le gaspillage de canaux
- Détection de collision :
 - facile dans les réseaux câblés : mesurez l'intensité du signal, comparez les signaux transmis et reçus
 - difficile dans le sans fil : la force du signal reçu est dépassée par la force de la transmission locale
- analogie humaine : le causeur poli (parle doucement)

Link Layer and LANs 6-30

30

CSMA/CD (collision detection)



Link Layer and LANs 6-31

31

Algorithme Ethernet CSMA/CD

1. La carte réseau (NIC) reçoit le datagramme de la couche réseau et crée une trame.
2. - Si le NIC détecte un canal inactive : lance la transmission de trames.
- Si la carte réseau détecte un canal occupé : attend jusqu'à ce que le canal soit inactif, puis émet.
3. Si le NIC transmet la totalité de la trame sans détecter une autre transmission : la tx est fini !
4. Si le NIC détecte une autre transmission en cours de transmission : abandonne et envoie un signal de bourrage.
5. Après l'abandon, le NIC entre en **backoff binaire (exponentiel)**:
 - après la m ième collision, NIC choisit K au hasard parmi $\{0, 1, 2, \dots, 2^{m-1}\}$. La carte réseau attend $K \times 512$ bit, retourne à l'étape 2
 - intervalle de différé plus long avec plus de collisions

Link Layer and LANs 6-32

32

CSMA/CD - Efficacité

- t_{prop} = délai prop max entre 2 noeuds dans LAN
- t_{trans} = temps pour transmettre une trame de taille max

$$efficacité = \frac{1}{1 + 5t_{prop} / t_{trans}}$$

- Efficacité tend vers 1
 - Quand t_{prop} tend vers 0
 - Quand t_{trans} tend vers l'infini
- meilleure performance que ALOHA : simple, pas cher, décentralisé !

Link Layer and LANs 6-33

33

Protocoles MAC «à tour de rôle»

Protocoles MAC de partitionnement de canal :

- partager le canal *efficacement* et *équitablement* à forte charge
- inefficace à faible charge : retard dans l'accès au canal, bande passante I/N allouée même s'il n'y a qu'un seul nœud actif !

Protocoles MAC à accès aléatoire

- efficace à faible charge : un seul nœud peut utiliser pleinement le canal
- charge élevée : coût de collision

Protocoles MAC «à tour de rôle»

- cherche le meilleur des deux modes !

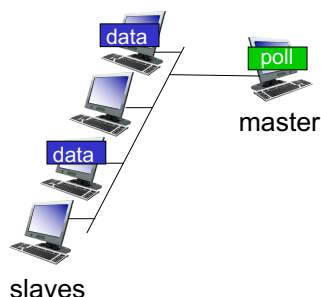
Link Layer and LANs 6-34

34

Protocoles MAC «à tour de rôle»

Sondage (Polling):

- le nœud maître «invite» les nœuds esclaves à transmettre à leur tour
- généralement utilisé avec des périphériques esclaves "stupides"
- Préoccupations :
 - coût de sondage
 - latence "polling"
 - point de défaillance unique (maître)



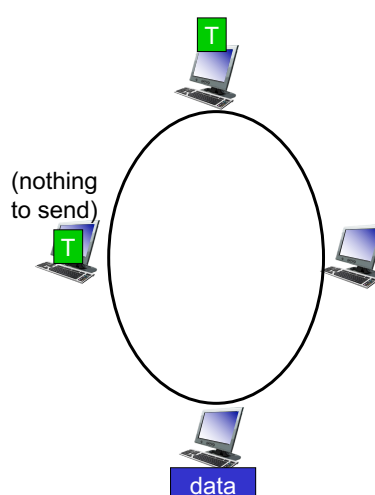
Link Layer and LANs 6-35

35

Protocoles MAC «à tour de rôle»

Passage de jeton

- *jeton* de contrôle transmis séquentiellement d'un nœud à l'autre.
- message symbolique
- Préoccupations :
 - coût de jeton
 - latence
 - point de défaillance unique (jeton)



Link Layer and LANs 6-36

36

Résumé des protocoles MAC

- *partitionnement des canaux*, par temps, fréquence ou code
 - division du temps, division des fréquences
- *accès aléatoire* (dynamique),
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - détection de porteuse : facile dans certaines technologies (filaire), difficile dans d'autres (sans fil)
 - CSMA/CD utilisé dans Ethernet
 - CSMA/CA utilisé dans 802.11
- *tour de rôle*
 - interrogation depuis le site central, passage de jeton
 - Bluetooth, FDDI, anneau à jeton

Link Layer and LANs 6-37

37

Couche Liaison, LANs : Plan

5.1 Introduction, services

5.2 Détection d'erreur, correction

5.3 Protocoles d'accès multiples

5.4 LAN

- *adressage, ARP*
- Ethernet
- commutateurs
- VLAN

5.5 Une journée dans la vie d'une demande Web

Link Layer and LANs 6-38

38

Adresse MAC et ARP

- Adresse IP 32 bits :
 - adresse de *couche réseau* pour l'interface
 - utilisé pour le transfert de couche 3 (réseau)
- Adresse MAC (ou LAN ou physique ou Ethernet) :
 - fonction: *utilisée «localement» pour obtenir la trame d'une interface à une autre interface connectée physiquement (même réseau, en termes d'adressage IP)*
 - Adresse MAC 48 bits (pour la plupart des réseaux locaux) gravée dans la ROM de la carte réseau, parfois configurable par logiciel
 - par exemple : 1A-2F-BB-76-09-AD

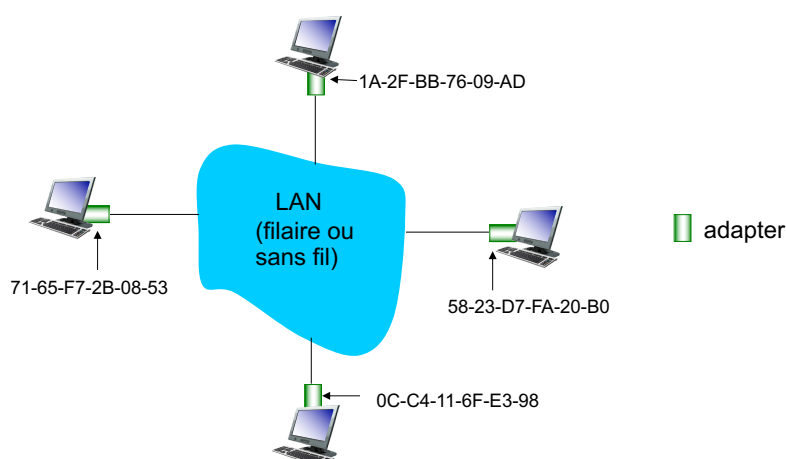
hexadecimal (base 16) notation
(chaque «chiffre» représente 4 bits)

Link Layer and LANs 6-39

39

Adresse LAN et ARP

chaque adaptateur sur le LAN a une adresse LAN unique



Link Layer and LANs 6-40

40

Adresse LAN (suite)

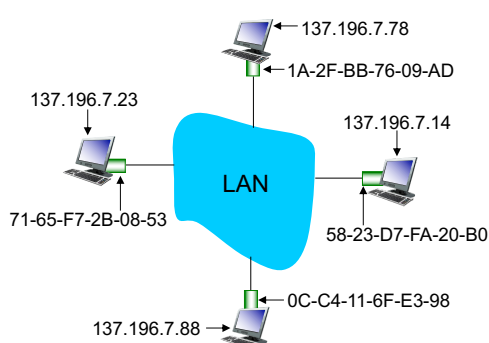
- Allocation d'adresse MAC administrée par IEEE
- le fabricant achète une partie de l'espace d'adressage MAC (pour garantir l'unicité)
- Analogie :
 - Adresse MAC: comme le numéro de sécurité sociale
 - Adresse IP : comme adresse postale
- MAC adresse plate -> portabilité
 - peut déplacer la carte LAN d'un réseau local à un autre
- Adresse hiérarchique IP *non* portable
 - l'adresse dépend du sous-réseau IP auquel le noeud est attaché

Link Layer and LANs 6-41

41

ARP: address resolution protocol

Question: comment déterminer l'adresse MAC de l'interface, connaissant son adresse IP ?



- **Table ARP** : chaque nœud IP (hôte, routeur) sur le réseau local a une table
 - Mappages d'adresses IP / MAC pour certains nœuds de réseau local:
- **<Adresse IP; Adresse Mac; TTL>**
 - TTL (Time To Live) : temps après lequel le mappage d'adresses sera oublié (généralement 20 min)

Link Layer and LANs 6-42

42

Protocole ARP : même LAN

- A veut envoyer un datagramme à B
 - L'adresse MAC de B ne figure pas dans la table ARP de A.
- Un paquet de requête ARP **broadcast**, contenant l'adresse IP de B
 - adresse MAC de destination = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - tous les nœuds du réseau local reçoivent une requête ARP
- B reçoit le paquet ARP, répond à A avec son adresse MAC (B)
 - trame envoyée à l'adresse MAC de A (unicast)
- Une paire d'adresses IP à MAC en mémoire cache dans sa table ARP jusqu'à ce que les informations deviennent anciennes (délai dépassé)
 - *soft state*: information qui expire (disparaît) sauf si elle est rafraîchie
- ARP est «plug-and-play» :
 - Les nœuds créent leurs tables ARP *sans intervention de l'administrateur du réseau.*

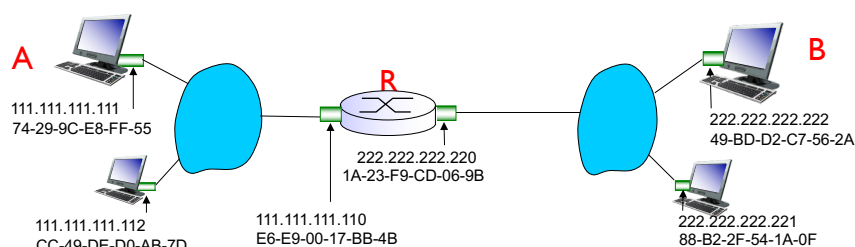
Link Layer and LANs 6-43

43

Adressage: routage vers un autre LAN

Procédure pas à pas : **envoyez un datagramme de A à B via R**

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

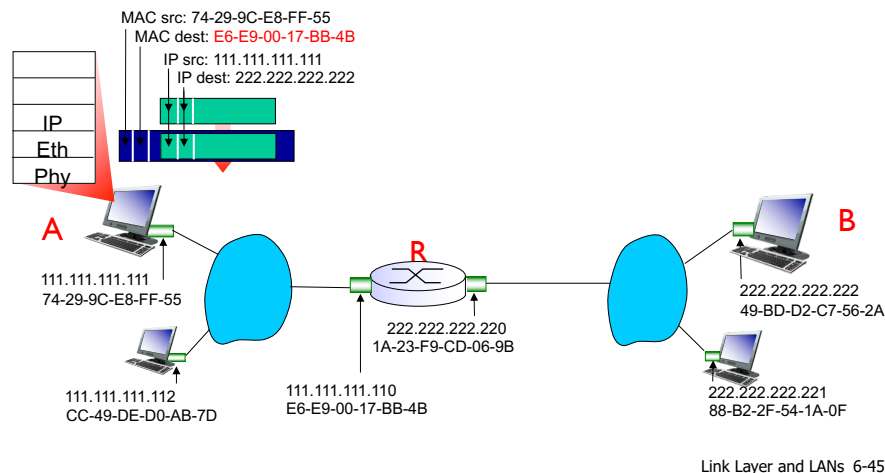


Link Layer and LANs 6-44

44

Adressage: routage vers un autre LAN

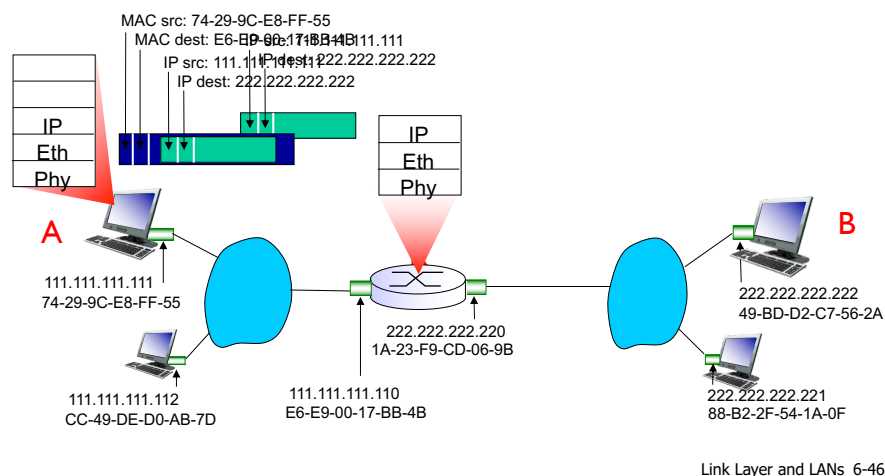
- A crée un datagramme IP avec la source IP A, la destination B
- A crée une trame avec l'adresse MAC de R comme adresse de destination, la trame contient le datagramme IP de A à B



45

Adressage: routage vers un autre LAN

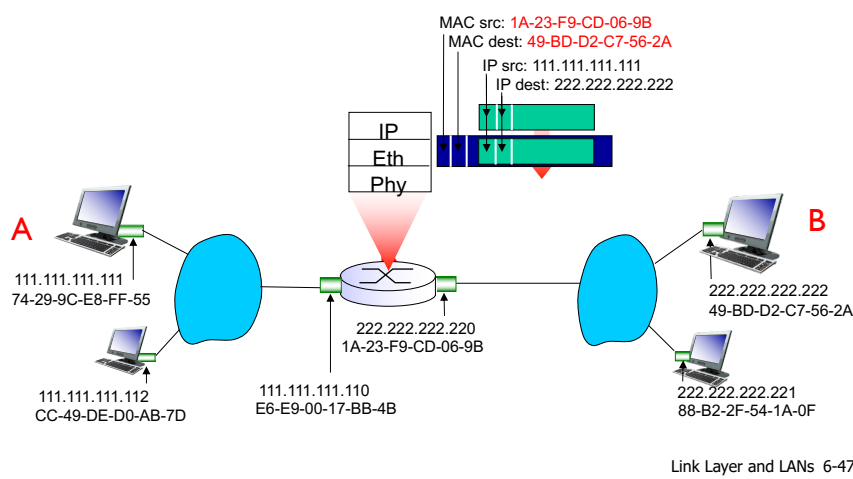
- trame envoyé de A à R
- trame reçue en R, datagramme enlevé, transmis à IP



46

Adressage: routage vers un autre LAN

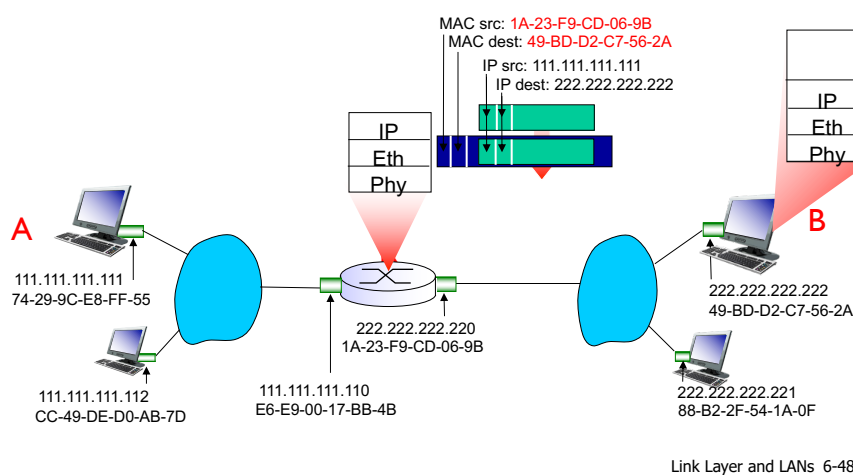
- R transmet le datagramme avec la source IP A, la destination B
- R crée une trame de Couche Liaison avec l'adresse MAC de B comme adresse de destination, la trame contient le datagramme IP de A à B



47

Adressage: routage vers un autre LAN

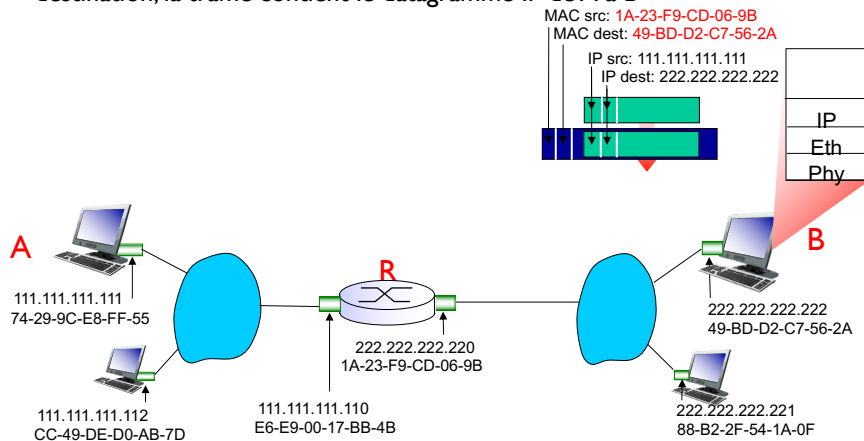
- R transmet le datagramme avec la source IP A, la destination B
- R crée une trame de Couche Liaison avec l'adresse MAC de B comme adresse de destination, la trame contient le datagramme IP de A à B



48

Adressage: routage vers un autre LAN

- R transmet le datagramme avec la source IP 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



* Check out the online interactive exercises for more examples: http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive/

Link Layer and LANs 6-49

49

TD- exo3

50

Couche Liaison, LANs: Plan

5.1 Introduction, services

5.2 Détection d'erreur, correction

5.3 Protocoles d'accès multiples

5.4 LAN

- adressage, ARP
- **Ethernet**
- commutateurs
- VLAN

5.5 Une journée dans la vie d'une demande Web

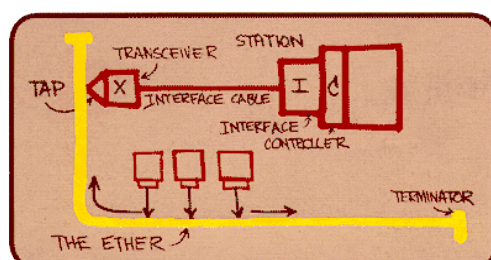
Link Layer and LANs 6-51

51

Ethernet

Technologie de réseau local câblé «dominante» :

- puce unique, vitesse multiples (par exemple, Broadcom BCM5761)
- première technologie LAN largement utilisée
- plus simple, pas cher
- la course à Vitesse : 10 Mbps - 10 Gbps - ...



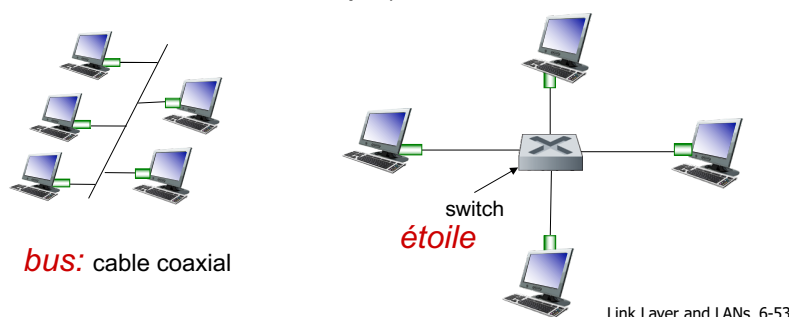
Esquisse Ethernet de Metcalfe

Link Layer and LANs 6-52

52

Ethernet : topologie physique

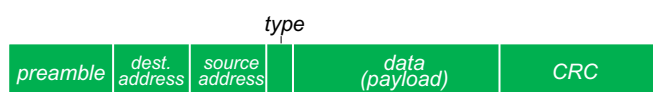
- **Bus** : populaire au milieu des années 90
 - tous les nœuds du même domaine de collision (peuvent entrer en collision les uns avec les autres)
- **Étoile** : prévaut aujourd'hui
 - **commutateur** actif au centre
 - chaque nœud exécute un protocole Ethernet (séparé) (les nœuds ne se collisionnent pas)



53

Ethernet – structure de trame

- l'adaptateur d'envoi : encapsule le datagramme IP (ou un autre paquet de protocole de couche réseau) dans une trame Ethernet



préambule:

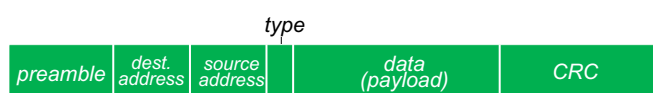
- suite de 7 octets 10101010 suivi d'un octet 10101011
- utilisé pour synchroniser le récepteur, les fréquences d'horloge de l'émetteur

Link Layer and LANs 6-54

54

Ethernet – structure de trame (suite)

- **Adresses** : adresses MAC source et de destination sur 6 octets
 - si l'adaptateur reçoit une trame avec une adresse de destination correspondante ou une adresse de diffusion (par exemple, un paquet ARP), il transmet les données dans la trame au protocole de la couche réseau
 - sinon, l'adaptateur jette la trame
- **Type** : indique le protocole de couche supérieure (principalement IP mais autres possibles, par exemple, Novell IPX, AppleTalk)
- **CRC** : contrôle de redondance cyclique chez le récepteur
 - erreur détectée : la trame est abandonnée



Link Layer and LANs 6-55

55

Ethernet: unreliable, connectionless

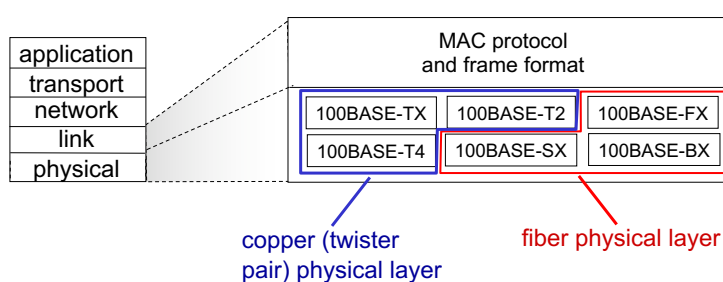
- **sans connexion** : pas de *handshaking* entre les cartes d'envoi et de réception
- **non fiable** : la carte réseau du récepteur n'envoie pas d'acks ou de nacks à la carte d'expéditeur
 - les données en trames perdues ne sont récupérées que si l'expéditeur initial utilise la couche supérieure (par exemple, TCP), sinon les données perdues sont perdues
- Protocole MAC Ethernet : *unslotted CSMA/CD avec backoff binaire*

Link Layer and LANs 6-56

56

Norme Ethernet 802.3: couches phy. et liaison

- **Nombreuses** normes Ethernet différentes
 - protocole MAC commun et format de trame
 - différentes vitesses : 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1 Gbps, 10 Gbps, 40 Gbps...
 - différents supports de couche physique : fibre, câble



Link Layer and LANs 6-57

57

Couche Liaison, LANs: Plan

5.1 Introduction, services

5.2 Détection d'erreur, correction

5.3 Protocoles d'accès multiples

5.4 LAN

- adressage, ARP
- Ethernet
- **commutateurs**
- VLAN

5.5 Une journée dans la vie d'une demande Web

Link Layer and LANs 6-58

58

Switch Ethernet

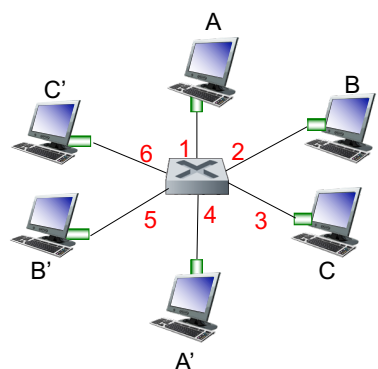
- **périphérique de Couche Liaison : prend un rôle *actif***
 - stocker, transférer des trames Ethernet
 - examine l'adresse MAC de la trame entrante, transmet **sélectivement** la trame à un ou plusieurs liens sortants lorsque la trame doit être transmise sur un segment, utilise CSMA/CD pour accéder
- ***transparent***
 - les hôtes ne sont pas conscients de la présence de commutateurs
- ***plug-and-play, auto-apprentissage***
 - les commutateurs n'ont pas besoin d'être configurés

Link Layer and LANs 6-59

59

Switch : *plusieurs* transmissions simultanées

- les hôtes ont une connexion directe dédiée pour passer/commutent les tampons de paquets
- protocole Ethernet utilisé sur *chaque* lien entrant, mais pas de collision; Full duplex
 - chaque lien est son propre domaine de collision
- ***Commutation*** : A à A' et B à B' peuvent émettre simultanément, sans collision



commutateur avec six interfaces
(1,2,3,4,5,6)

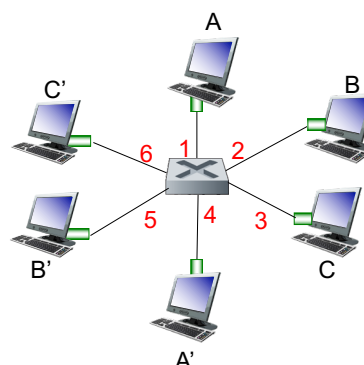
Link Layer and LANs 6-60

60

Switch - table de redirection

Q: comment le commutateur sait-il que A' est accessible via l'interface 4, que B' est accessible via l'interface 5 ?

- ❖ **R:** chaque commutateur a une **table de commutation**, chaque entrée:
- (Adresse MAC de l'hôte, interface pour atteindre l'hôte, durée de vie)
 - ressemble à une table de routage !



commutateur avec six interfaces (1,2,3,4,5,6)

Q: comment les entrées sont-elles créées, maintenues dans la table de commutation ?

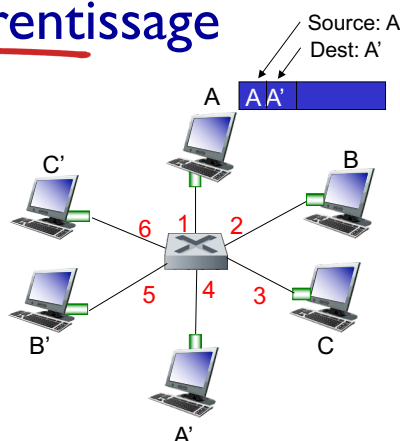
- quelque chose comme un protocole de routage?

Link Layer and LANs 6-61

61

Switch : auto-apprentissage

- commutateur **apprend** quels hôtes peuvent être atteints à travers quelles interfaces
 - lorsque la trame est reçue, le commutateur «apprend» l'emplacement de l'expéditeur : segment LAN entrant
 - enregistre la paire émetteur / lieu dans la table de commutation



MAC addr	interface	TTL
A	1	60

Switch table (initially empty)

Link Layer and LANs 6-62

62

Switch : filtrage/transfert de trames

Quand une trame est reçue par un commutateur :

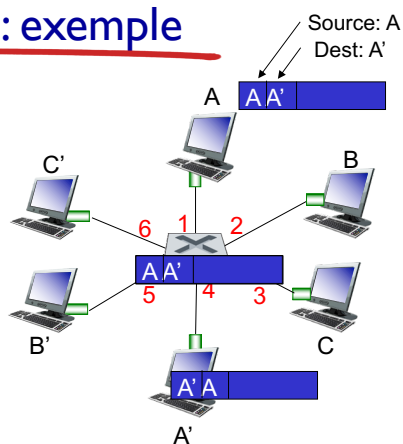
1. enregistre le lien entrant, l'adresse MAC de l'hôte émetteur
2. indexe dans la table de commutation utilisant l'adresse de destination MAC
3. **si** entrée trouvée pour la destination
 - alors**{
 - si** destination sur le segment à partir duquel la trame est arrivée,
 - alors** ignorer la trame
 - sinon** transférer la trame sur l'interface indiquée par l'entrée
 - }**
 - sinon** inonder /*sur ttes interfaces sauf l'interface d'arrivée */

Link Layer and LANs 6-63

63

Auto-apprentissage, tx : exemple

- trame destination, A', lieu inconnu : **inonder**
- destination A lieu connu : **envoyer sélectivement sur un seul lien**



MAC addr	interface	TTL
A	1	60
A'	4	60

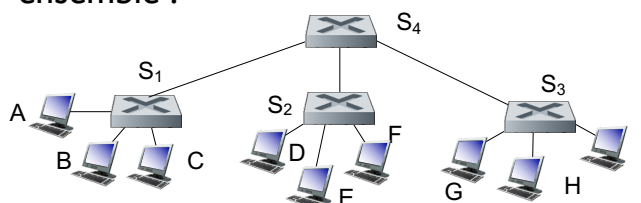
table de commutation
(initialement vide)

Link Layer and LANs 6-64

64

Interconnexions switch

- Les commutateurs peuvent être connectés ensemble :



Q: envoi de A à G - Comment S1 sait-il transférer la trame destinée à G via S4 et S3 ?

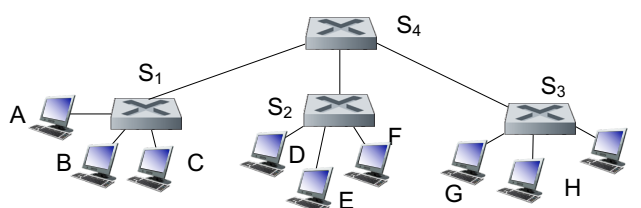
R: auto-apprentissage ! (fonctionne exactement comme dans un commutateur unique !)

Link Layer and LANs 6-65

65

Exp d'auto-apprentissage multi-switch

Supposons que C envoie la trame à I, I répond à C

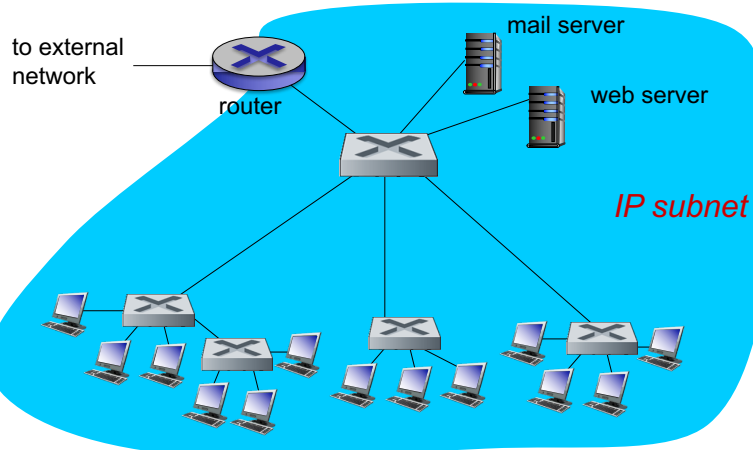


Q: affiche les tables de commutation et la transmission de paquets dans S1, S2, S3, S4
A faire à la maison.

Link Layer and LANs 6-66

66

Réseau institutionnel



Link Layer and LANs 6-67

67

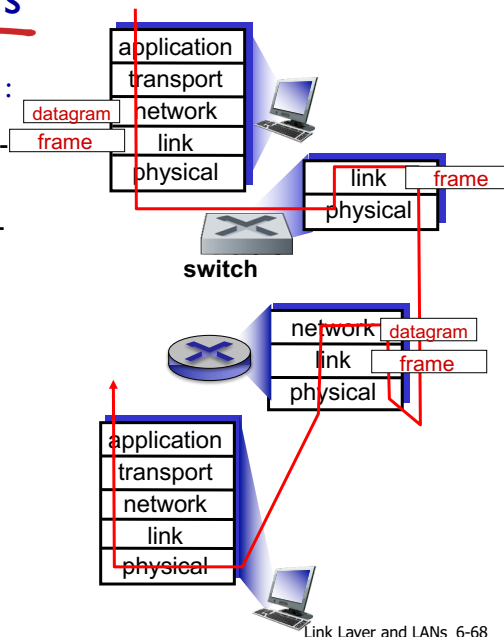
Switches vs. routeurs

Les deux sont store-and-forward :

- **Routers** : périphériques de la couche réseau (examinez les entêtes de la couche réseau)
- **Switches** : périphériques de la couche liaison (examine les entêtes de la couche liaison)

les deux ont des tables de transfert :

- **Routers** : tables de calcul utilisant des algorithmes de routage, adresses IP
- **Switches** : apprennent la table de transfert en utilisant l'inondation, l'apprentissage, les adresses MAC



Link Layer and LANs 6-68

68

Couche Liaison, LANs: Plan

5.1 Introduction, services

5.2 Détection d'erreur, correction

5.3 Protocoles d'accès multiples

5.4 LAN

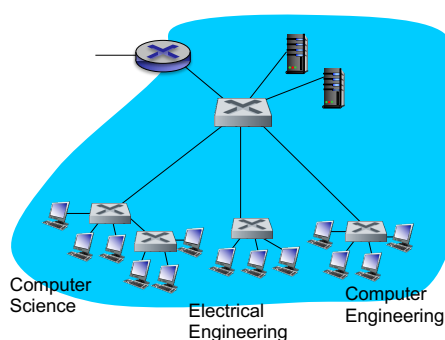
- adressage, ARP
- Ethernet
- commutateurs
- **VLAN**

5.5 Une journée dans la vie d'une demande Web

Link Layer and LANs 6-69

69

VLANs : motivation



Problème :

- un utilisateur de CS change de bureau pour EE, mais souhaite se connecter à un commutateur CS ?
- domaine de diffusion unique :
 - tout le trafic de diffusion de couche 2 (ARP, DHCP, emplacement inconnu de l'adresse MAC de destination) doit traverser tout le réseau local
 - sécurité/confidentialité, problèmes d'efficacité

Link Layer and LANs 6-70

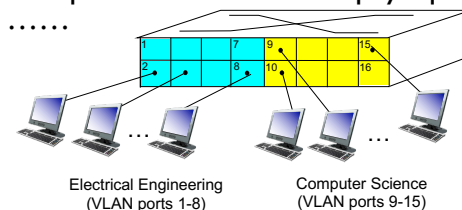
70

VLANs

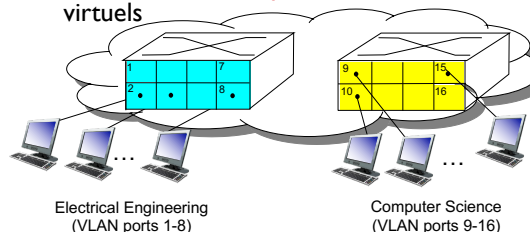
Virtual Local Area Network

Les commutateurs prenant en charge les capacités VLAN peuvent être configurés pour définir plusieurs LANS **virtuels** sur une infrastructure LAN physique unique.

VLAN basé sur les ports: ports de commutateur regroupés (par le logiciel de gestion de commutateur) afin que **seul** commutateur physique



... fonctionne comme **plusieurs** commutateurs virtuels

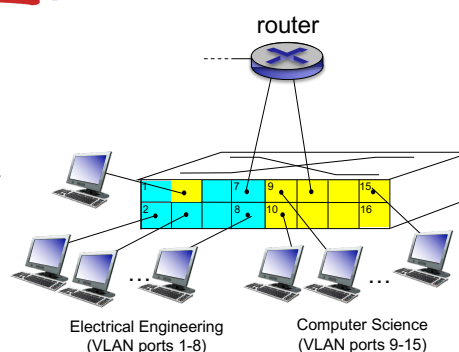


Link Layer and LANs 6-71

71

VLAN basé sur le port

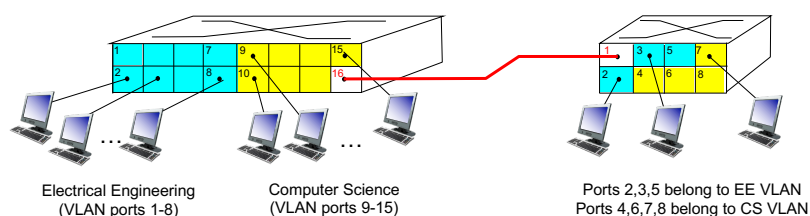
- **Isolation du trafic :** les trames vers/ depuis les ports 1 à 8 ne peuvent atteindre que les ports 1 à 8
 - peut également définir un réseau local virtuel basé sur les adresses MAC des terminaux, plutôt que sur le port de commutation
- **Appartenance dynamique :** les ports peuvent être affectés de manière dynamique entre les VLAN
 - dans la pratique, les vendeurs vendent des commutateurs combinés plus des routeurs
- **Transfert entre réseaux locaux virtuels :** effectué via un routage (comme avec des commutateurs séparés)



Link Layer and LANs 6-72

72

VLANs couvrant plusieurs switches

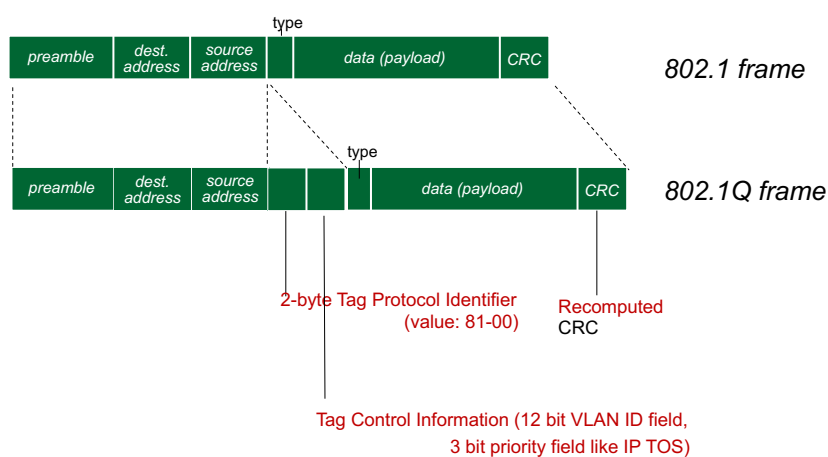


- **Port trunk** : transporte les trames entre les réseaux locaux virtuels définis sur plusieurs commutateurs physiques
 - les trames transférées au sein du VLAN entre les commutateurs ne peuvent pas être des trames 802.1 (elles doivent porter les informations d'identification du VLAN)
 - Le protocole 802.1q ajoute/supprime des champs d'en-tête supplémentaires pour les trames transférées entre les ports de ligne réseau

Link Layer and LANs 6-73

73

802.1Q VLAN - format de trame



Link Layer and LANs 6-74

74

Couche Liaison, LANs: Plan

5.1 Introduction, services

5.2 Détection d'erreur,
correction

5.3 Protocoles d'accès
multiples

5.4 LAN

- adressage, ARP
- Ethernet
- commutateurs
- VLAN

5.5 Une journée dans la vie
d'une demande Web

Link Layer and LANs 6-75

75

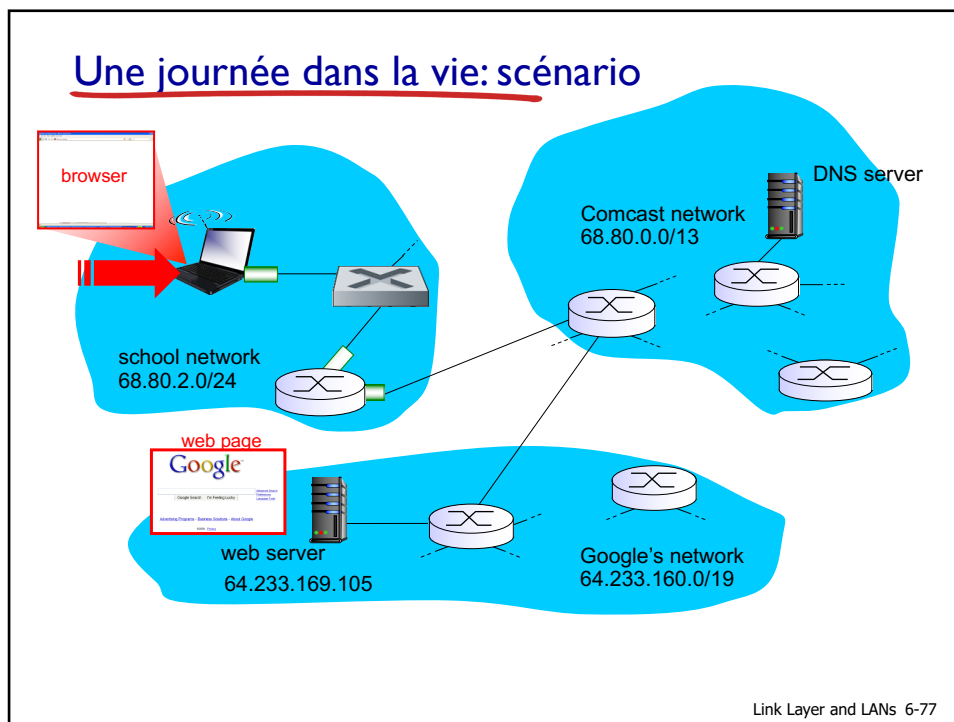
Synthèse: une journée dans la vie d'une req web

- descendre la pile de protocoles complete !
 - application, transport, réseau, liaison
- mettre tout ça ensemble : synthèse !
 - *Objectif* : identifier, examiner, comprendre les protocoles (à toutes les couches) impliqués dans un scénario apparemment simple: demander la page www
 - *Scénario* : un étudiant connecte un ordinateur portable au réseau du campus, demande/reçoit www.google.com

Link Layer and LANs 6-76

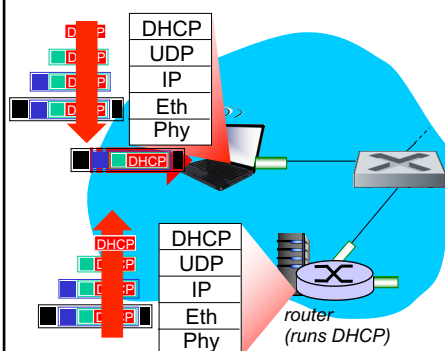
76

Une journée dans la vie: scénario



77

Une journée dans la vie... connexion à Internet

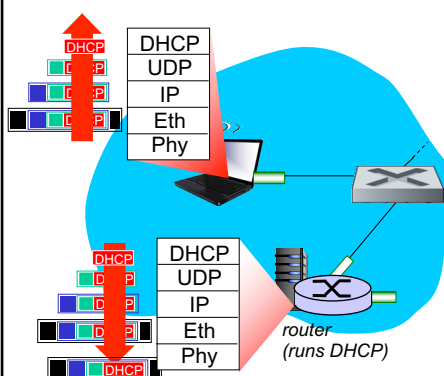


- Ordinateur portable qui se connecte doit obtenir sa propre adresse IP, adresse du routeur du premier saut, adresse du serveur DNS : utilisez **DHCP**
- Requête DHCP **encapsulée** dans **UDP**, encapsulée dans **IP**, encapsulée dans Ethernet **802.3**
- **Diffusion** de trame Ethernet (destination: FFFFFFFFFF) sur le réseau local, reçue sur le routeur exécutant le **serveur DHCP**
- Ethernet **démultiplexé** sur IP, **démultiplexé**, UDP, **démultiplexé** sur DHCP

Link Layer and LANs 6-78

78

Une journée dans la vie... connexion à Internet



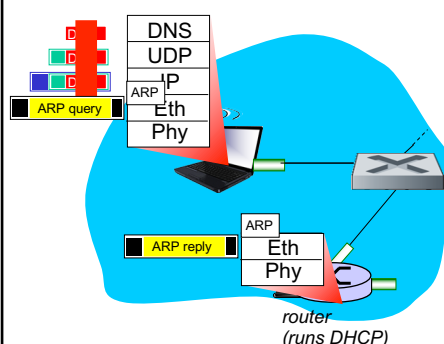
- Le serveur DHCP formule un **DHCPACK** contenant l'adresse IP du client, l'adresse IP du routeur de premier saut pour le client, le nom et l'adresse IP du serveur DNS.
- encapsulation** sur serveur DHCP, transmission de trames (apprentissage du commutateur) via le réseau local, démultiplexage sur le client
- Le client DHCP reçoit une réponse DHCPACK

Le client a maintenant une adresse IP, sait le nom et l'adresse du DNS serveur, adresse IP de son routeur de premier saut

Link Layer and LANs 6-79

79

Une journée ... ARP

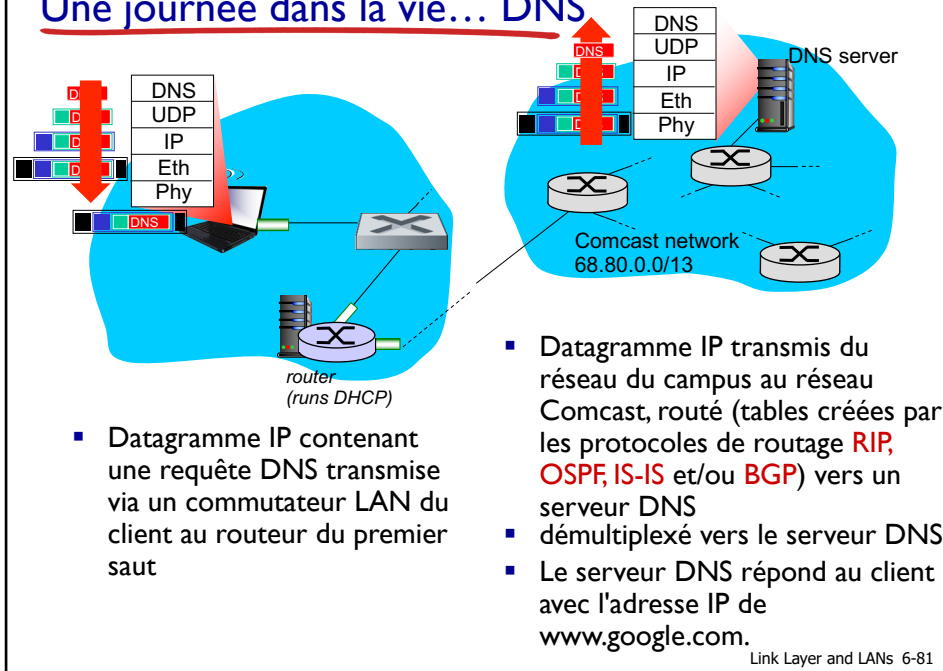


- avant d'envoyer la requête **HTTP**, besoin de l'adresse IP de www.google.com : **DNS**
- Requête DNS créée, encapsulée dans UDP, encapsulée dans IP, encapsulée dans Eth. Pour envoyer la trame au routeur, vous avez besoin de l'adresse MAC de l'interface du routeur : **ARP**
- Diffusion de **requête ARP**, reçue par le routeur, qui répond avec une **réponse ARP** en donnant l'adresse MAC de l'interface du routeur
- le client connaît maintenant l'adresse MAC du routeur de premier saut et peut donc maintenant envoyer une trame contenant une requête DNS

Link Layer and LANs 6-80

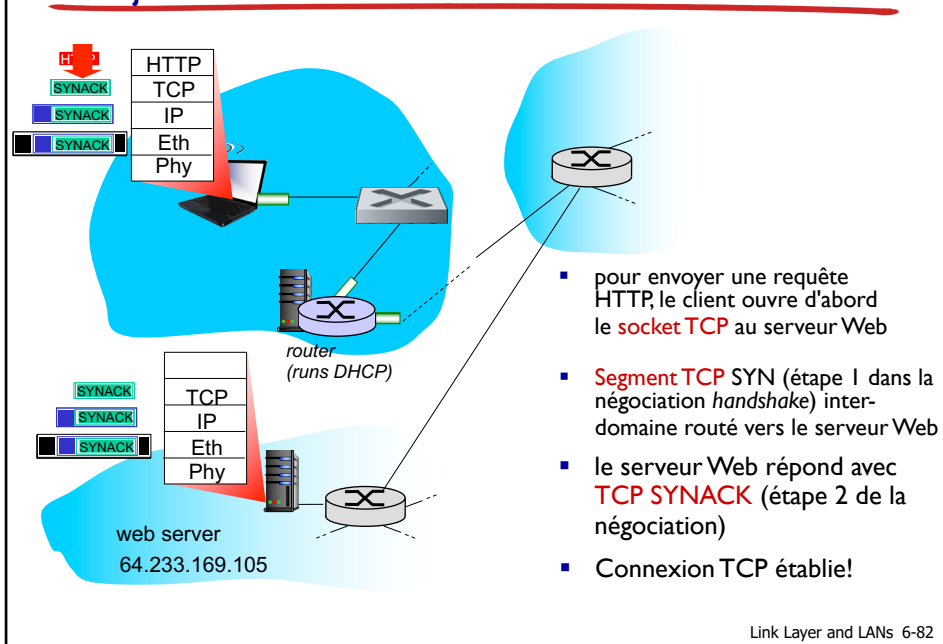
80

Une journée dans la vie... DNS

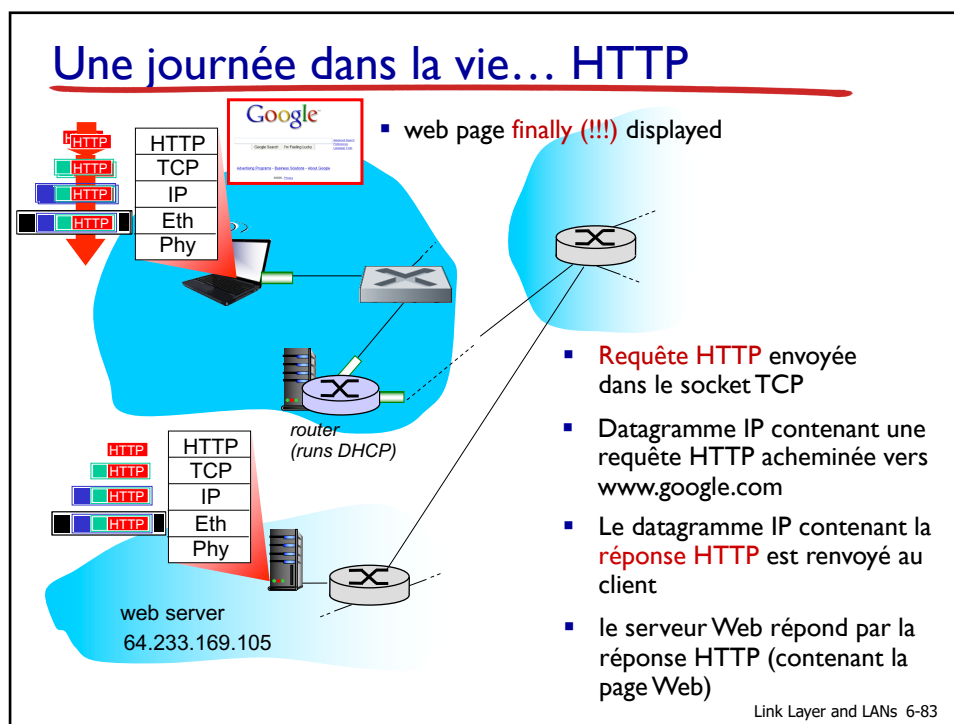


81

Une journée dans la vie...connexion TCP



82



83

Chapitre 6: Résumé

- principes de base des services de couche Liaison de données :
 - détection d'erreur, correction
 - partage d'un canal de diffusion : accès multiple
 - adressage de Couche Liaison
- instanciation et implémentation de différentes technologies de couche Liaison
 - Ethernet
 - commutés LANS, VLAN
- Synthèse : une journée dans la vie d'une requête web

Link Layer and LANs 6-84

84

Chapitre 6 : respirons

- trajet vers le bas de la pile de protocoles *complète* (sauf PHY)
- solide compréhension des principes de mise en réseau, de la pratique
- ... pourrait s'arrêter ici... mais *beaucoup* de sujets intéressants !
 - Réseaux sans fil
 - Multimédia
 - Sécurité

Link Layer and LANs 6-85