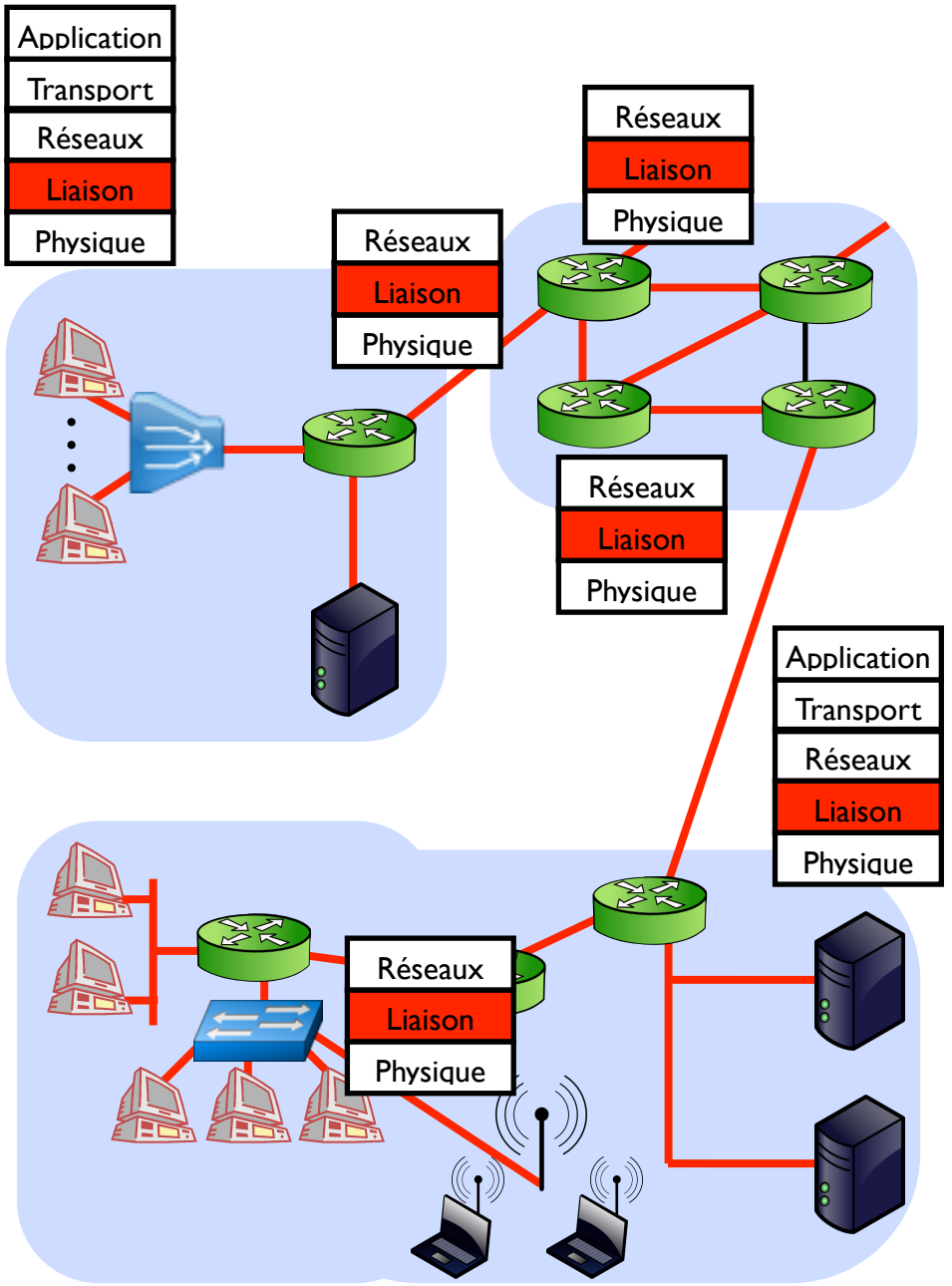
Couche
Liaison de données

Plan

1. Introduction
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

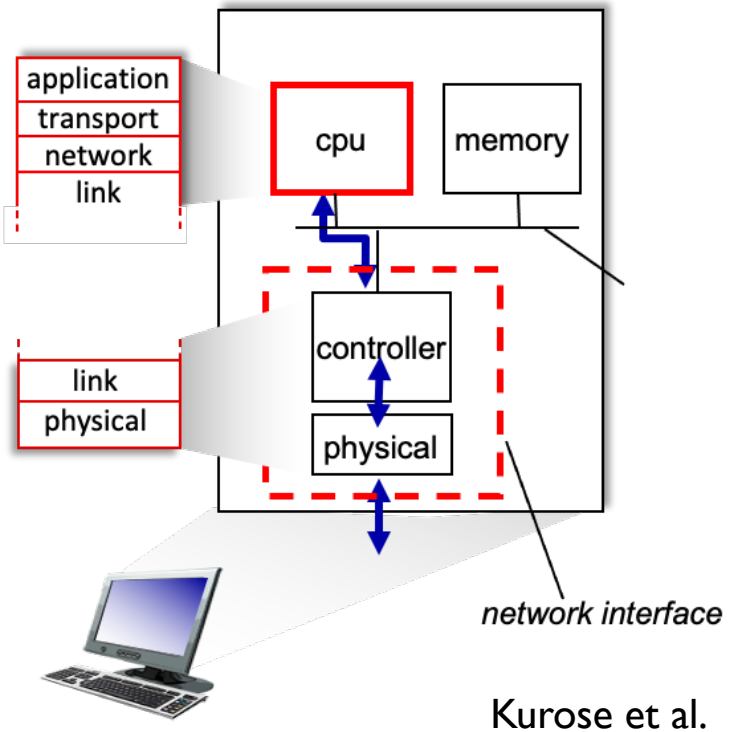
Introduction

- Couche Liaison sur tous les noeuds
  - Terminaux, routeurs et commutateurs
- Assure le transfert d'un datagramme sur un lien
  - entre deux ou plusieurs noeuds voisins
- Encapsule les datagrammes dans des trames
- Nombreux protocoles
  - Filaires, sans fil ; dédiés ou partagés
  - Les plus utilisés : Ethernet et Wi-Fi



Où est implémentée la couche Liaison de données ?

- Dans la carte réseau
  - Interface / adaptateur réseau
  - NIC : Network Interface Card
- Intégrée à la machine
  - cartes parfois extérieures
- Reliée au système par des bus
- Mini-ordinateur
  - CPU, mémoire
  - Fonctionne en parallèle de l'OS
- Hardware, firmware, software



Kurose et al.

Plan

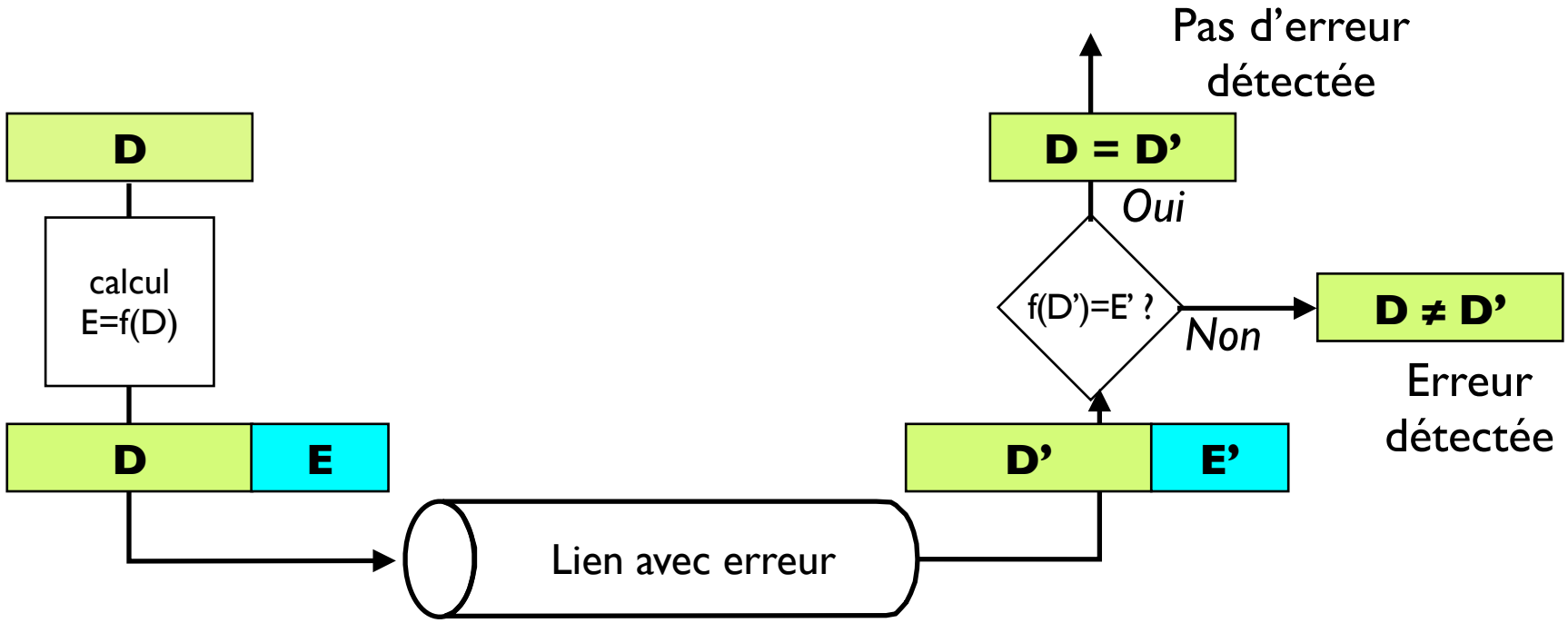
1. Introduction
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

Détection et correction d'erreurs

- Erreur sur les liens de transmissions
  - atténuation du signal, bruit, interférences
  - surtout sur les liens sans fil (radio)
- Détection d'erreurs détermine si la trame reçue est considérée comme en erreurs
  - Parfois, correction d'erreurs par le récepteur sans retransmission
- Service de détection et correction d'erreurs est optionnel au niveau 2,
  - mais détection d'erreur souvent implémentée dans les protocoles de niveau 2
  - réalisé au niveau hardware (efficace)
- Pourquoi faire de la détection d'erreurs à plusieurs niveaux ?

Détection et correction d'erreur

- **D** : Données à protéger
- **E** : Bits de Détection et/ou Correction d'erreur
  - construits à partir de **D** et concaténés à **D**



- Note : la détection d'erreur n'est jamais fiable à 100% !
  - les protocoles peuvent manquer des erreurs (rare) : faux positif
  - si taille de E ↗, alors précision des détection et correction ↗

Contrôle de redondance cyclique

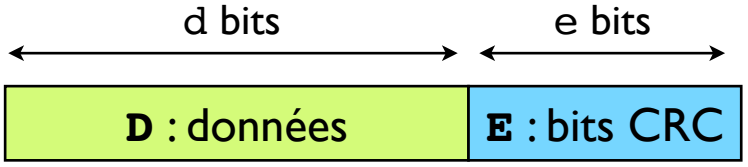
- CRC - "Cyclic Redundancy Check"
  - utilisé par Ethernet, Wi-Fi, …
- bits de données, **D**, vus comme un nombre binaire
- générateur **G** connu de l'émetteur et du récepteur
  - clef partagée de taille **e+1** bits

émetteur

- pour chaque donnée **D**, calcule **E** (=CRC), de longueur **e** bits
  - tel que <**D,E**> soit exactement divisible par **G** (modulo 2)
  - <**D,E**> = bits de **D** concaténés avec les bits de **E**

récepteur

- divise <**D',E'**> (bits reçus) par **G**.
  - si le reste n'est pas nul, alors une erreur est détectée
- Avantage : détecte les erreurs en série de taille inférieure à **e+1** bits

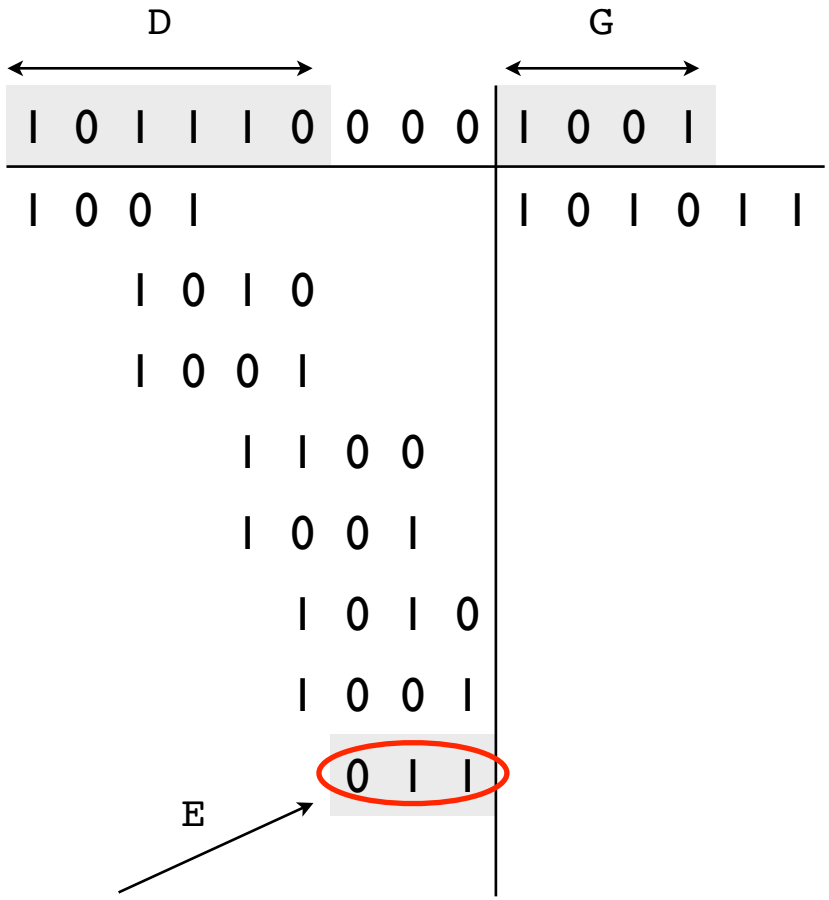


représentation binaire

formule mathématique

Exemple CRC

- Entrée
  - G : générateur (partagé)
  - D : données
- Cherche E tel que
  - $D \cdot 2^e$ XOR E = nG
- Equivaut à
  - $D \cdot 2^e$ = nG ·XOR E
- Equivaut à
  - E = reste [$D \cdot 2^e$ / G]
- Message envoyé : 101110011

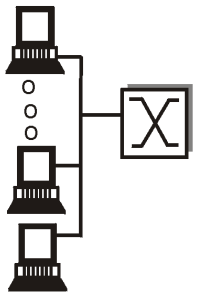


Plan

1. Introduction
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

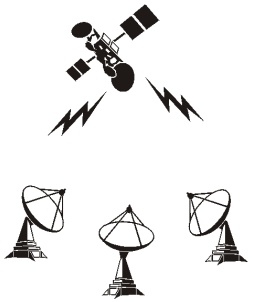
Types de liens

- Canal Unidirectionnel ou Bidirectionnel
- Canal Half-duplex ou Full-duplex
- Canal dédié - Réseaux point-à-point
  - Ethernet (IEEE 802.3) commuté
- Canal (médium) partagé - Réseaux à diffusion (“broadcast”)
  - Ethernet (IEEE 802.3) historique (par bus ou par hub)
  - Wi-Fi (IEEE 802.11)



câble partagé
(ex : Ethernet)

sans-fil partagé
(ex : WLAN)



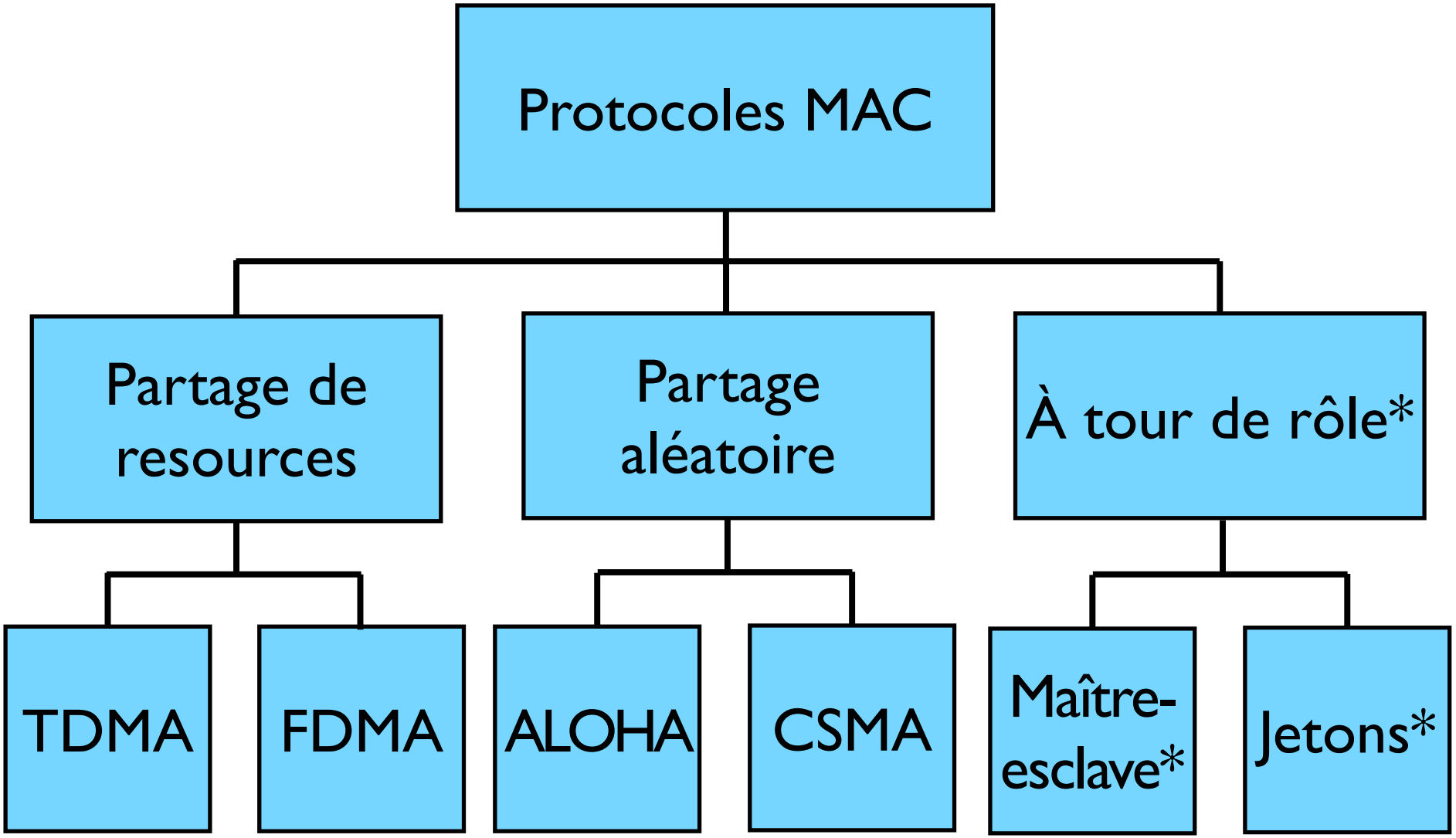
satellite

soirée entre
amis

Problème du canal partagé

- Si une seule émission → OK
- Si 2 ou + émissions simultanées → interférences (possibles) → collision
- Comment décider le partage du canal entre les noeuds ?
  - protocole MAC (medium access control)

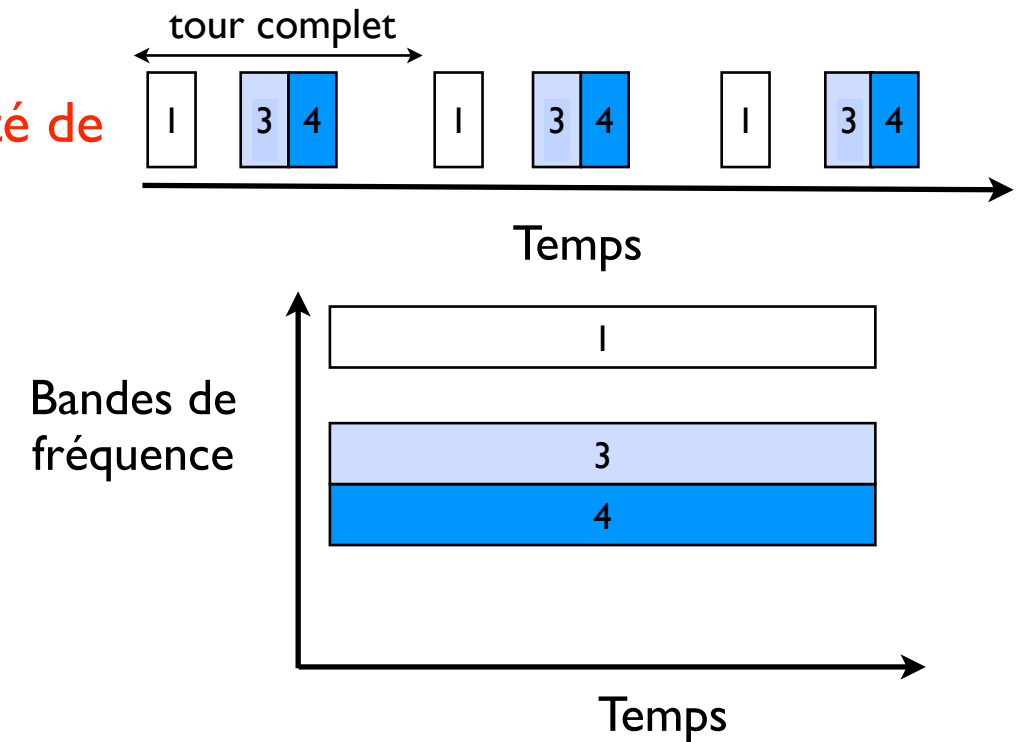
Classification des protocoles MAC (1)



* pas discutés dans ce cours

Classification des protocoles MAC (2)

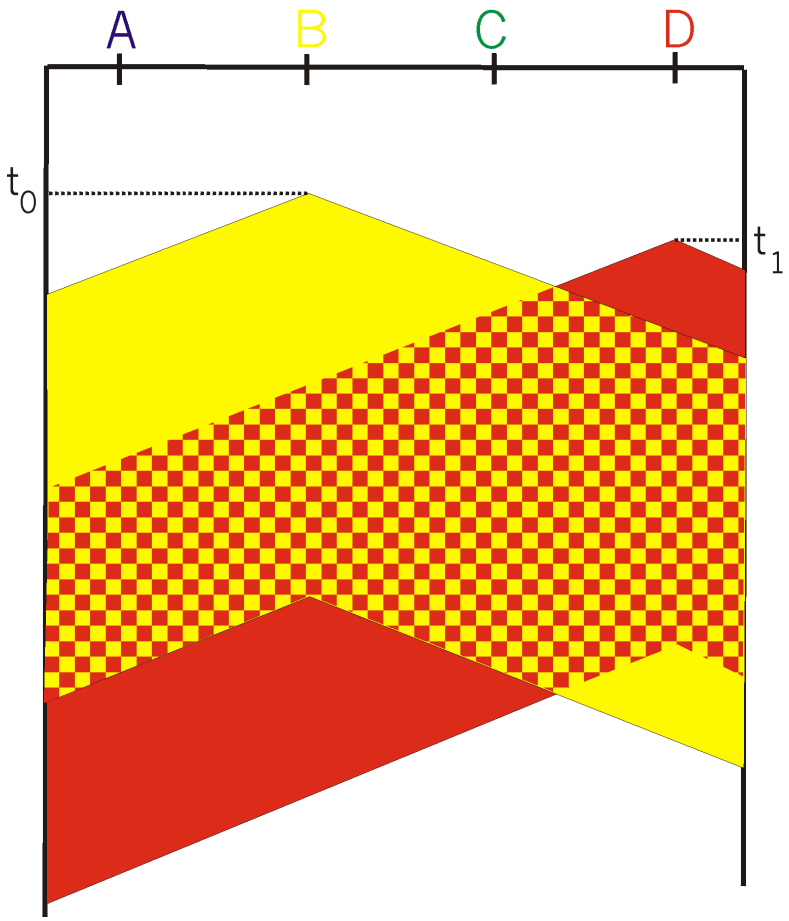
- Protocoles à partage de resources
  - Basés sur un partage "statique" des resources
  - Découpage du canal en plusieurs portions
  - Pas de collisions
  - TDMA = découpage du temps en unité de temps
  - FDMA = découpage de la bande de fréquences en sous-bandes



Classification des protocoles MAC (3)

- Protocoles à accès aléatoire
  - Basés sur un partage "aléatoire" des resources
  - Les paquets émis occupent tout le canal
  - Collisions possibles
    - nécessite un mécanisme de gestion des collisions
  - ALOHA
    - envoi de la trame sans écoute du médium de communication
    - efficace seulement si très peu de trafic
  - CSMA
    - Carrier Sense Multiple Access
    - écoute du médium avant envoi
    - collision toujours possible

Collision avec une approche CSMA



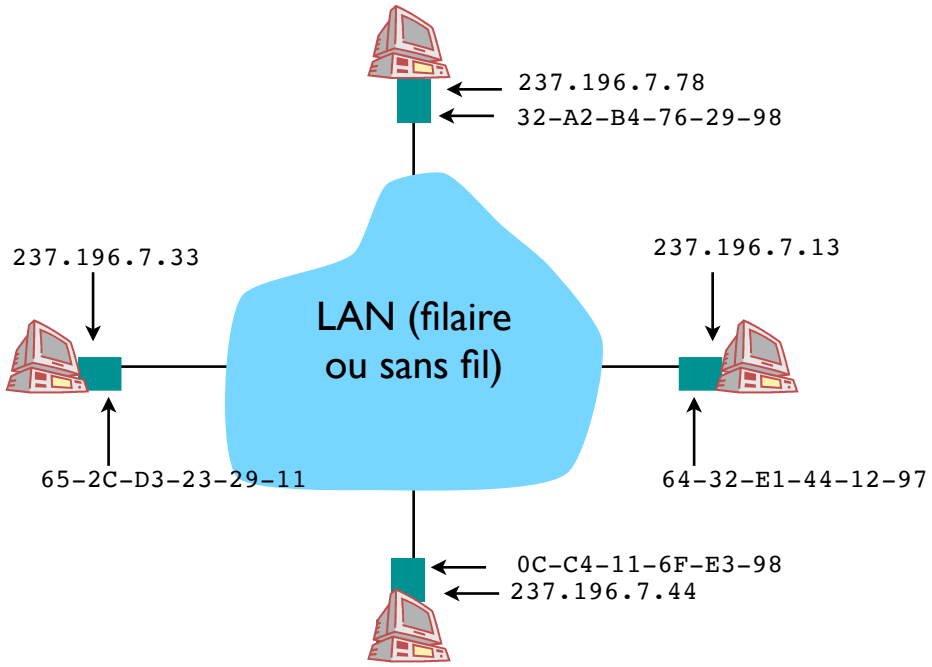
Plan

1. Introduction
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

Adresses MAC (1)

- Adresse IP (v4)
  - Format : 32 bits
  - Couche Réseau
  - But : acheminer un datagramme vers le sous-réseau destination
  - Sens topologique
    - Allocation dépend du sous-réseau IP
- Adresses MAC (matérielle, physique)
  - Format : 48 bits (en général) gravés “en dur”
  - Couche Liaison
  - But : transférer une trame vers une interface du même LAN
  - Chaque carte réseau possède une adresse MAC unique
  - Aucun sens topologique
    - Allocation des adresses MAC gérée par IEEE
    - Les fabricants achètent des espaces d’adresses MAC

Adresses MAC (2)



carte réseau

Le LAN peut être un (ou plusieurs) commutateur(s) Ethernet

- Adresse de diffusion (adresse de broadcast)
  - FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - Toutes les cartes du LAN reçoivent les trames l'ayant comme @MAC DST
  - Les commutateurs relaient les trames en broadcast de niveau 2 (pas les routeurs)
- Domaine de diffusion
  - L'ensemble des noeuds (interfaces) recevant les trames envoyées en diffusion par un noeud (interface)

ARP : Address Resolution Protocol

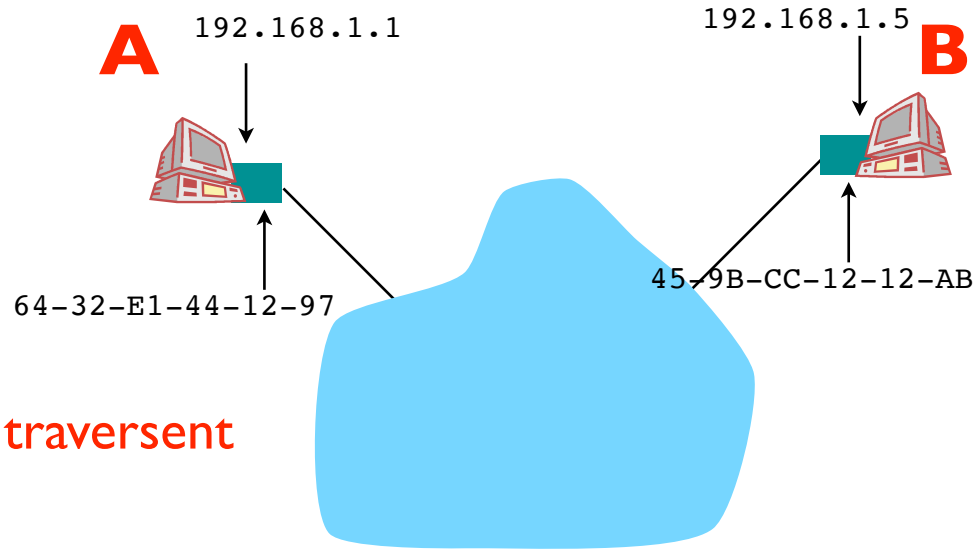
- Comment connaître l'adresse MAC d'un noeud sachant son adresse IP ?
  - Protocole ARP (couche 2.5)
- Chaque noeud IP (terminal ou routeur) a une table ARP
- Table ARP
  - associe des adresses IP à des adresses MAC
  - `< IP address; MAC address; TTL >`
    - Time To Live : durée de vie de l'association (ex : 20 min)
- Exemple de table ARP :

```
$ arp -a
Address                  HWtype  HWaddress           Flags Mask            Iface
192.168.2.174            ether   00:11:25:9B:7F:74   C                     eth0
192.168.2.2              ether   00:17:65:C7:10:45   C                     eth0
```

- Le protocole ARP est "plug and play"
  - chaque noeud construit et maintient sa table ARP automatiquement

ARP : à l'intérieur d'un LAN

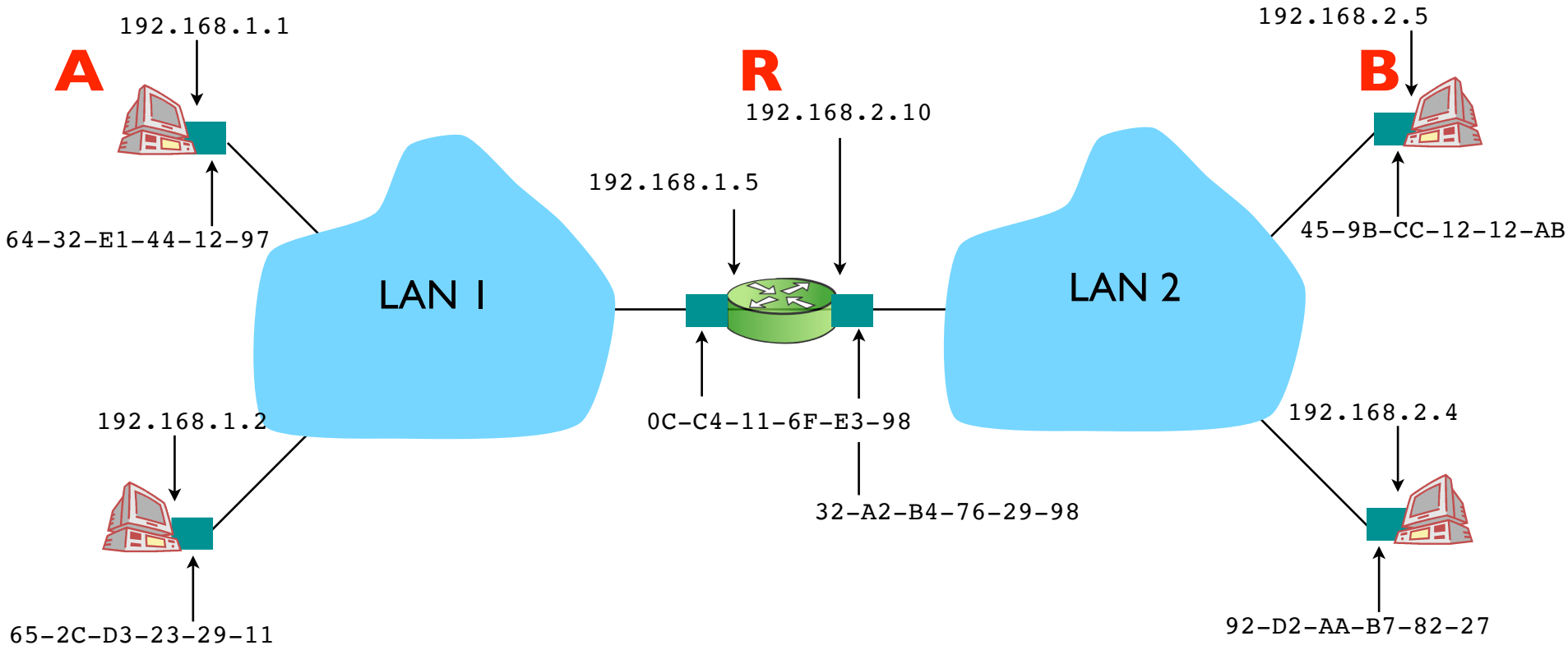
- Hypothèses
  - A et B sont sur un même LAN
  - A doit envoyer un datagramme à B
  - Les tables ARP sont vides
- Les requêtes ARP (envoyées en diffusion) traversent les commutateurs (switch)



1. A émet une requête ARP contenant l'@IP de B et avec pour @MAC dst : `FF-FF-FF-FF-FF-FF`
2. Toutes les machines du LAN reçoivent cette requête, mais seul B répond à A en émettant une trame unicast avec son @MAC
3. A garde en cache cette association `< IP address; MAC address>` dans sa table ARP pendant un laps de temps
   - le "timer" est réinitialisé à chaque utilisation de l'adresse

ARP : routage vers un autre LAN (1)

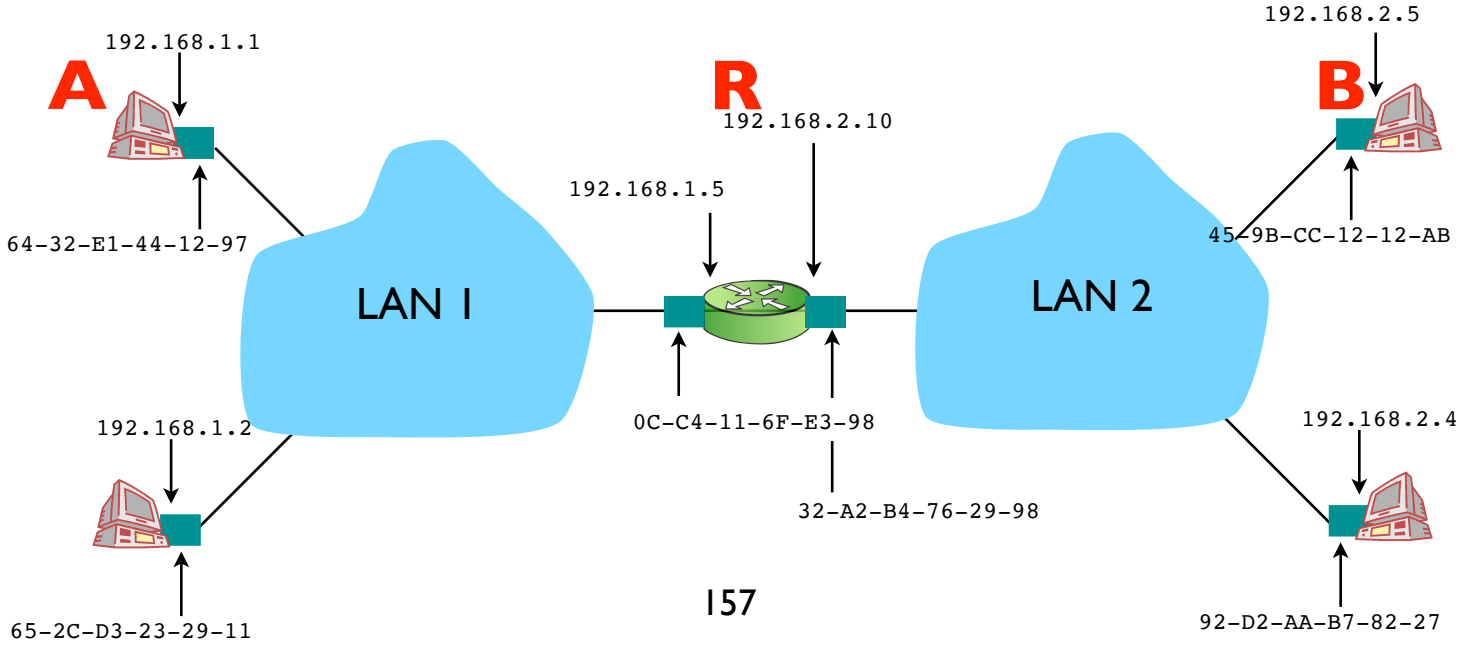
- Hypothèses
  - Idem mais cette fois-ci A et B sont sur des LANs différents



Le routeur R a deux tables ARP : une pour chaque LAN

ARP : routage vers un autre LAN (2)

1. A génère un datagramme avec @IP src = A et @IP dst = B
2. A s'appuie sur ARP pour obtenir l'@MAC de R sur 192.168.1.5
3. A génère une trame avec @MAC dst = R qui encapsule le datagramme
4. La trame est émise par la carte de A et reçue par celle de R
5. R extrait le datagramme de la trame et voit qu'il est destiné à B
6. R s'appuie sur ARP pour obtenir l'@MAC de B
7. R génère une trame contenant le datagramme et l'envoie à B



Plan

1. Introduction
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

Ethernet

- Nom commercial du standard IEEE 802.3
- Technologie dominante pour les LANs filaires
  - plus simple et moins chère que les LANs à jeton ou ATM
  - première technologie LAN massivement employée
  - régulièrement améliorée : par exemple 10 Mbps → 10 Gbps

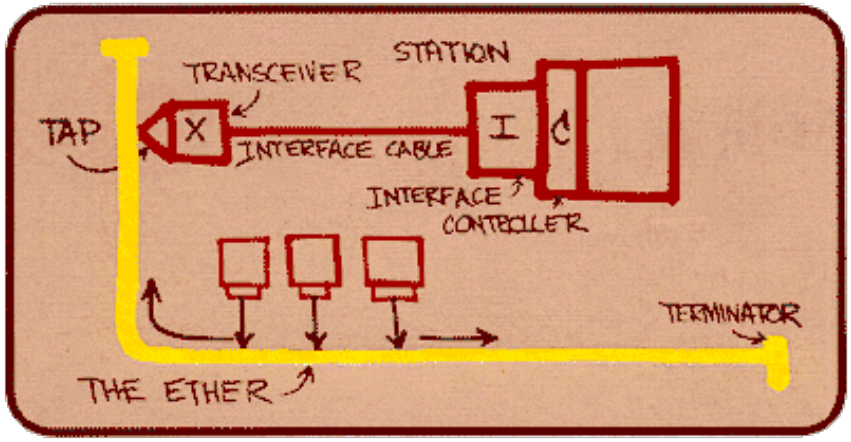


diagramme de Metcalfe (1975)

Structure d'une trame Ethernet

- La carte émetteur encapsule le datagramme IP dans une trame Ethernet

- Préambule
  - synchronise le récepteur avec l'horloge de l'émetteur
- Adresses MAC
  - 6 octets (= 48 bits)
  - si une carte reçoit une trame avec son @MAC comme @MAC dst ou l'@ de diffusion (ex : requête ARP),
    - elle délivre les données de la trame à la couche Réseau
  - sinon, elle supprime la trame
- Type
  - indique le protocole de la couche directement supérieure
    - généralement IP, ICMP ou ARP
- CRC
  - sur 32 bits
  - vérifié au niveau de la carte
  - si une erreur est détectée, la trame est rejetée

Ethernet : caractéristiques

- Sans connexion
  - Pas d'établissement de connexion entre les cartes émetteur et récepteur avant émission des données
- Non fiable
  - le récepteur n'acquitte pas les trames reçues
  - mais vérifie bien l'intégrité des trames avec le CRC
    - trame erronée non remontée à la couche supérieure et non retransmise
- Différentes versions d'Ethernet
  - 100 Mb/s - 1 Gb/s - 10 Gb/s - 100 Gb/s (et +)
  - cuivre ou fibre
  - liens point-à-point bidirectionnels full-duplex

Plan

1. Introduction et Services
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

Commutateur (“Switch”)

- Équipement de la couche Liaison
- 3 rôles
  - Filtre la retransmission des trames (selon @MAC dst)
  - Segmente les domaines de collisions (toujours)
  - Segmente les domaines de diffusion (VLAN, cf suite)
- Fonctionnement
  - mode “Store-and-forward”
- Transparent et “Plug-and-play” (auto-apprentissage)
  - Pas besoin d’être configuré (sauf VLAN)
  - Inconnu des terminaux
- Ports
  - qu’on relie aux liens de communication
  - buffers associés pour stocker des trames éventuelles
- Chaque port possède une adresse MAC pour l’administrer
  - Mais un commutateur ne modifie pas l’entête Liaison des trames qu’il relaie

Auto-apprentissage

- Chaque commutateur a une table de commutation
  - Attention, ≠ table ARP
- Format des entrées dans cette table
  - `< @MAC ;  Port (Interface) ;  TTL >`
  - chaque entrée a une certaine durée de vie max (ex : 60 min)
- Le commutateur apprend quels terminaux il peut atteindre depuis chacun de ses ports
  - lorsqu'il reçoit une trame, il apprend la localisation de l'émetteur
  - ... et enregistre cette information dans sa table

Réexpédition et filtrage

- Lorsqu'un commutateur reçoit une trame
  - Recherche dans sa table de commutation l'@MAC dst
  - Si une entrée correspondante est trouvée
    - Alors Si l'@MAC dst est sur le même port (port sur lequel la trame a été reçue)
      - alors la trame est supprimée
    - Sinon,
      - il ré-émet la trame sur le port indiqué

        ➡ Filtrage
  - Sinon
    - il inonde : ré-émet sur tous les autres ports

Plan

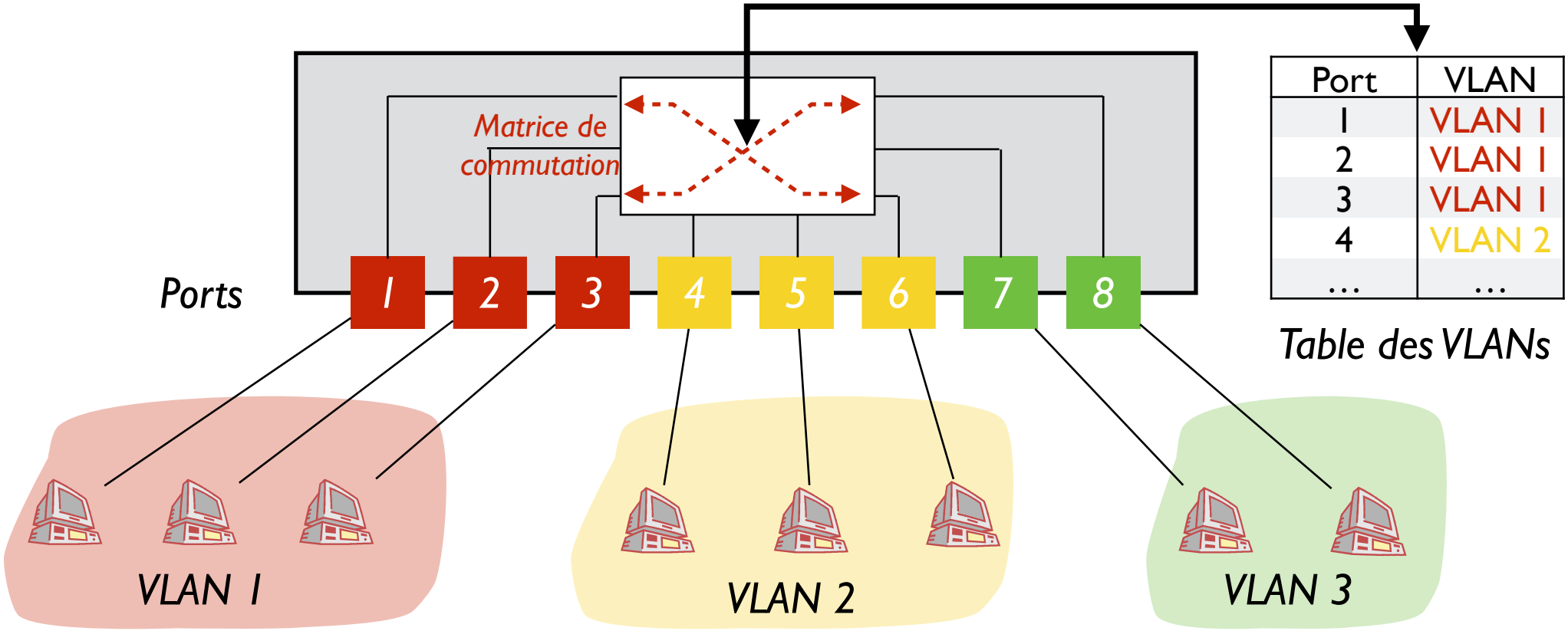
1. Introduction et Services
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

VLANs (1)

- Problèmes d'un grand réseau avec seulement des commutateurs
  - Un seul domaine de diffusion
    - problème de performances
  - Sécurité
    - Un terminal peut émettre des trames vers un autre terminal du même LAN
    - Comment ?
      - en utilisant l'@MAC de diffusion
    - Un terminal -Oscar- peut capturer le trafic destiné à un autre -Alice- du même LAN
    - Comment ?
      - En obtenant l'@MAC d'Alice par ses requêtes ARP et en l'usurpant
      - En forgeant des réponses ARP frauduleuses sur l'@IP d'Alice et @MAC d'Oscar

VLANs (2)

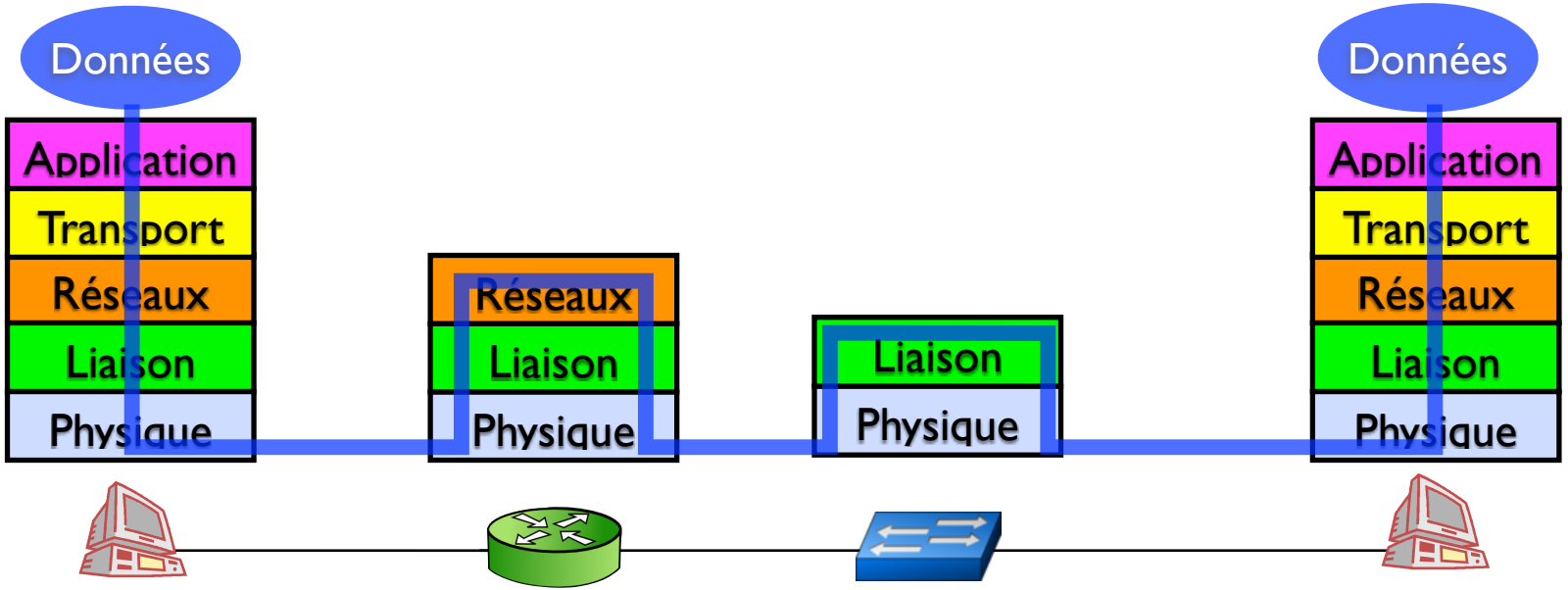
- VLANs (Virtual Local Area Networks)
- Segmenter un LAN en plusieurs réseaux logiques indépendants



- Segmentation du domaine de diffusion
  - Une trame (même en diffusion) provenant d'un noeud du VLAN2 ne sera ré-émise que sur les ports du VLAN 2
  - Chaque VLAN définit un domaine de diffusion

Commutateur vs Routeur

- Un routeur
  - Équipement de niveau 3
  - Connecte des noeuds de sous-réseaux différents
  - Maintient une table de routage et intègre un algorithme de routage
  - Maintient une table ARP
- Un commutateur
  - Équipement de niveau 2
  - Connecte des noeuds du même sous-réseau (sauf VLAN)
  - Maintient une table de commutation
  - Maintient une table des VLANs



Synthèse

	Commutateur	**Routeur**
Isoler le trafic	Oui	Oui
Plug & Play	Oui (sauf VLAN)	Non
Acheminement optimal	Non	Oui
“Store and forward”	Oui	Oui

1. Introduction et Services
2. Détection et correction d'erreurs
3. Protocoles MAC
4. Adressage sur la couche Liaison & ARP
5. Ethernet
6. Commutateurs
7. VLANs
8. Technologie Wi-Fi

IEEE 802.11

- Wi-Fi est basé sur le standard IEEE 802.11
  - couche physique
  - couche liaison de données
  - pour les points d'accès et les stations mobiles des réseaux locaux sans fil
- Alliance Wi-Fi
  - interopérabilité entre les différents constructeurs
- Évolution du standard
  - 1997 / 1999 / 2007 / 2012 / 2016 / 2021
  - 802.11a/b/g/n/ac/ax

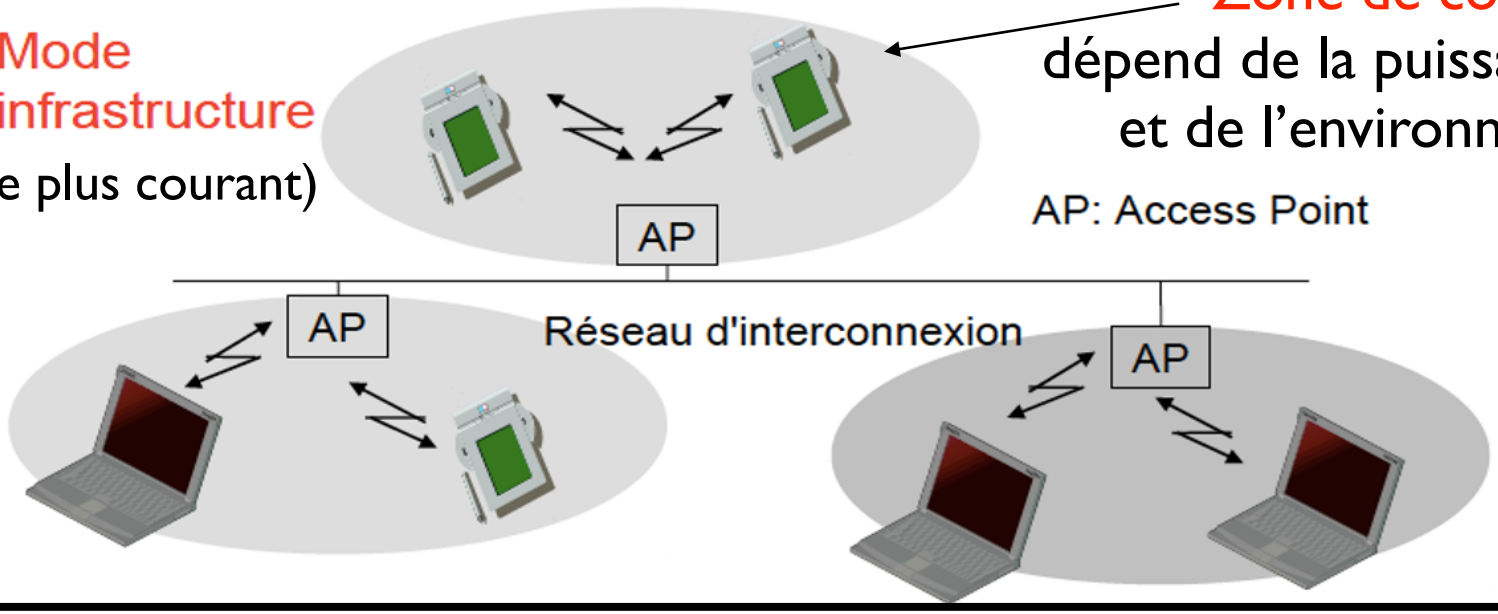
Architectures

Zone de couverture

dépend de la puissance d'émission et de l'environnement radio

Mode infrastructure

(le plus courant)



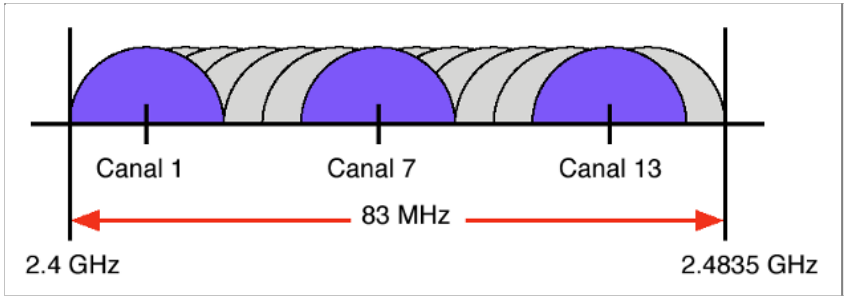
AP: Access Point

Mode ad hoc

Copyright slides Qiu

Bandes de fréquences du Wi-Fi

- Utilisation des fréquences radio
- Bande de fréquences ISM : fréquences libres
- 2,4 GHz : 14 canaux de 20 MHz
- 5 GHz : 22 canaux (indépendants) de 20 MHz
- 6 GHz : 24 canaux (indépendants) de 20 MHz (Europe)
  - très dépendant des pays
- Communication entre deux noeuds
  - si les deux noeuds sont sur le même canal
  - canal de 20 MHz ou canal agrégé de 40, 80 ou 160 MHz
- Un noeud ne peut émettre que sur un seul canal à la fois



Autres paramètres de la couche physique

- Modulation
  - plusieurs modulations possibles
  - ex. : BPSK, 16-QAM
- Taux de codage
  - données de contrôle pour la correction d'erreurs
- Nombre d'antennes
  - 1, 2, 3 et 4 (principalement)
- Largeur de bande
- Intervalle de garde
  - pour limiter l'impact de la propagation multi-chemin

Capacités d'émission (1)

Nombre d'antennes utilisées

Largeur du canal

Intervalle de garde

Modulation and coding schemes

MCS index[a]	Spatial Streams	Modulation type	Coding rate	Data rate (in Mbit/s)[16][b]							
				20 MHz channels		40 MHz channels		80 MHz channels		160 MHz channels	
				800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI
0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65
1	1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195
3	1	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
4	1	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
5	1	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520
6	1	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585
7	1	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650
8	1	256-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
9	1	256-QAM	5/6	N/A	N/A	180	200	390	433.3	780	866.7
0	2	BPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
1	2	QPSK	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
2	2	QPSK	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
3	2	16-QAM	1/2	52	57.8	108	120	234	260	468	520
4	2	16-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
5	2	64-QAM	2/3	104	115.6	216	240	468	520	936	1040
6	2	64-QAM	3/4	117	130.3	243	270	526.5	585	1053	1170
7	2	64-QAM	5/6	130	144.4	270	300	585	650	1170	1300
8	2	256-QAM	3/4	156	173.3	324	360	702	780	1404	1560

Une capacité d'émission possible

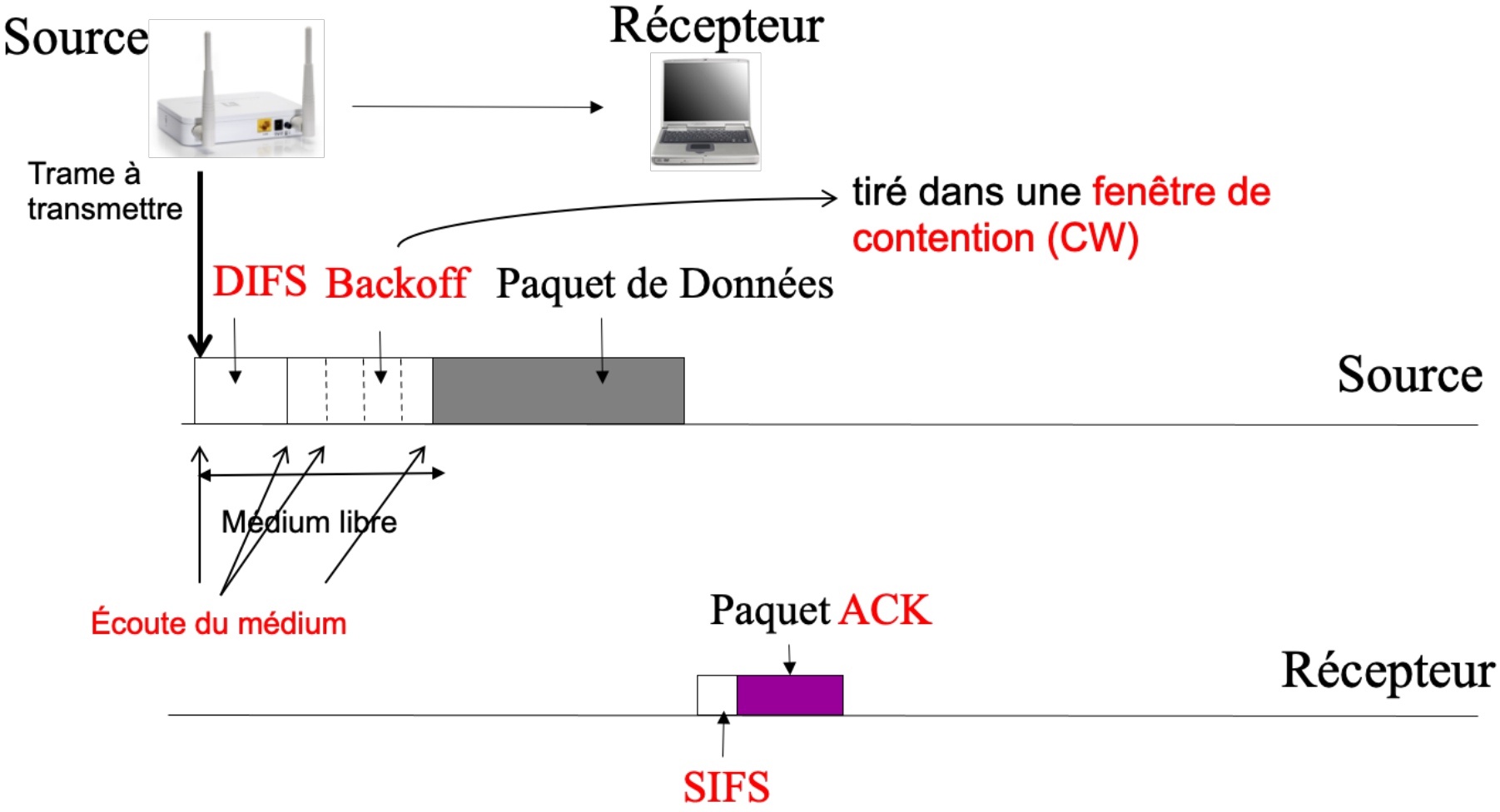
Capacités d'émission (2)

- Quel paramétrage choisir pour quelle capacité ?
- Règle (simplifiée)
  - plus la capacité d'émission est élevée, moins la transmission est robuste (plus il y a des chances pour que les paquets soient considérés en erreur)
- Choix dynamique de la capacité d'émission
  - réalisé par l'émetteur
  - algorithme d'adaptation de débit
    - propriétaire (parfois open-source) ou libre

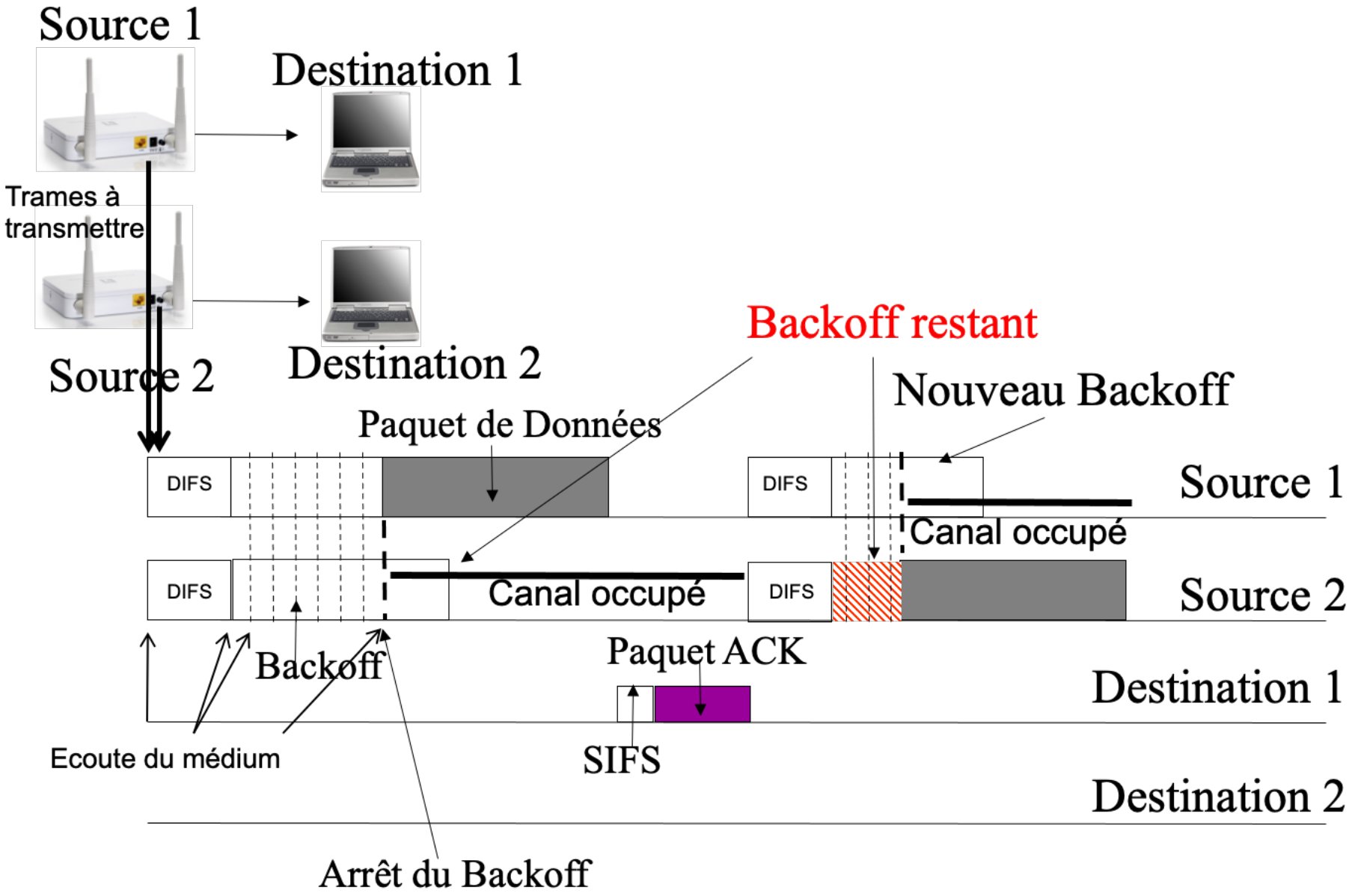
Protocole MAC (1)

- Approche CSMA
- Pas possible de faire du Collision Detection
  - donc le récepteur accuse la bonne réception des données avec des trames d'acquittement
    - ACK de niveau 2 (différents des ACK de TCP)
  - on doit attendre la fin de la transmission même si elle est corrompue par une collision
    - il faut éviter le plus possible les collisions
    - CSMA / CA : CA = collision avoidance

Protocole MAC (2)



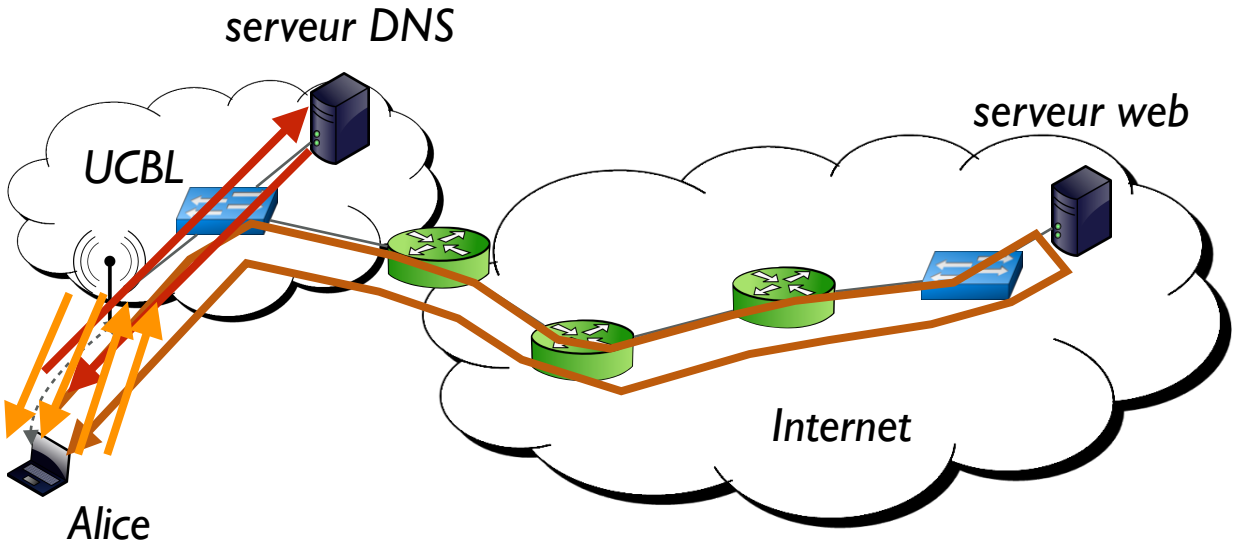
Protocole MAC (3)
Contention

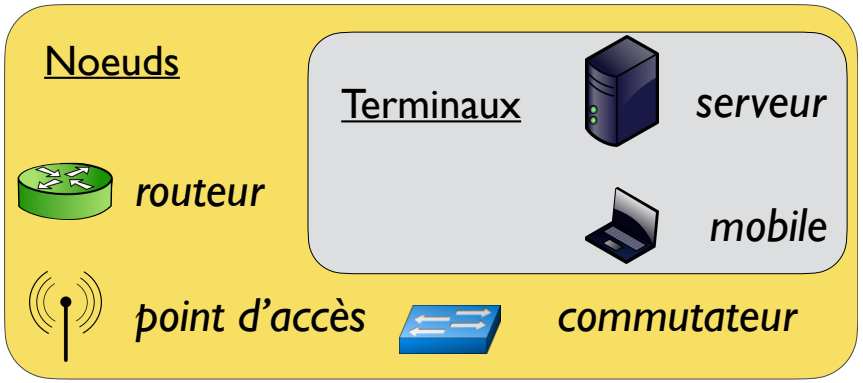


Protocole MAC (4)
Gestion des collisions

- Si 2 noeuds émettent en même temps
  - collision possible sur un destinataire
  - n'envoie pas d'ACK
  - retransmission de la source
- Chaque retransmission utilise le protocole MAC
  - avec un backoff tiré dans une fenêtre de contention 2 fois plus grande qu'à la transmission précédente
  - algorithme du BEB (Binary Exponential Backoff)
- Nombre de retransmissions limité
  - paquet rejeté
- Chaque transmission d'un nouveau paquet utilise la fenêtre de contention initiale

Exemple 4





Alice https://www.youtube.com/watch?v=9Y29TXdrBM4

Résolution DNS : Requête DNS : segment UDP - Quelle adresse IP pour www.youtube.com/watch?v=9Y29TXdrBM4 ?

Acquittement Wi-Fi AP vers Alice

Réponse DNS : *segment UDP - 172.217.171.238*

Acquittement Wi-Fi Alice vers AP

Requête / réponse http : Phase de négociation TCP

Acquittement Wi-Fi AP vers Alice

Acquittement Wi-Fi Alice vers AP

Etc.

Fin du Cours