

Réseaux locaux

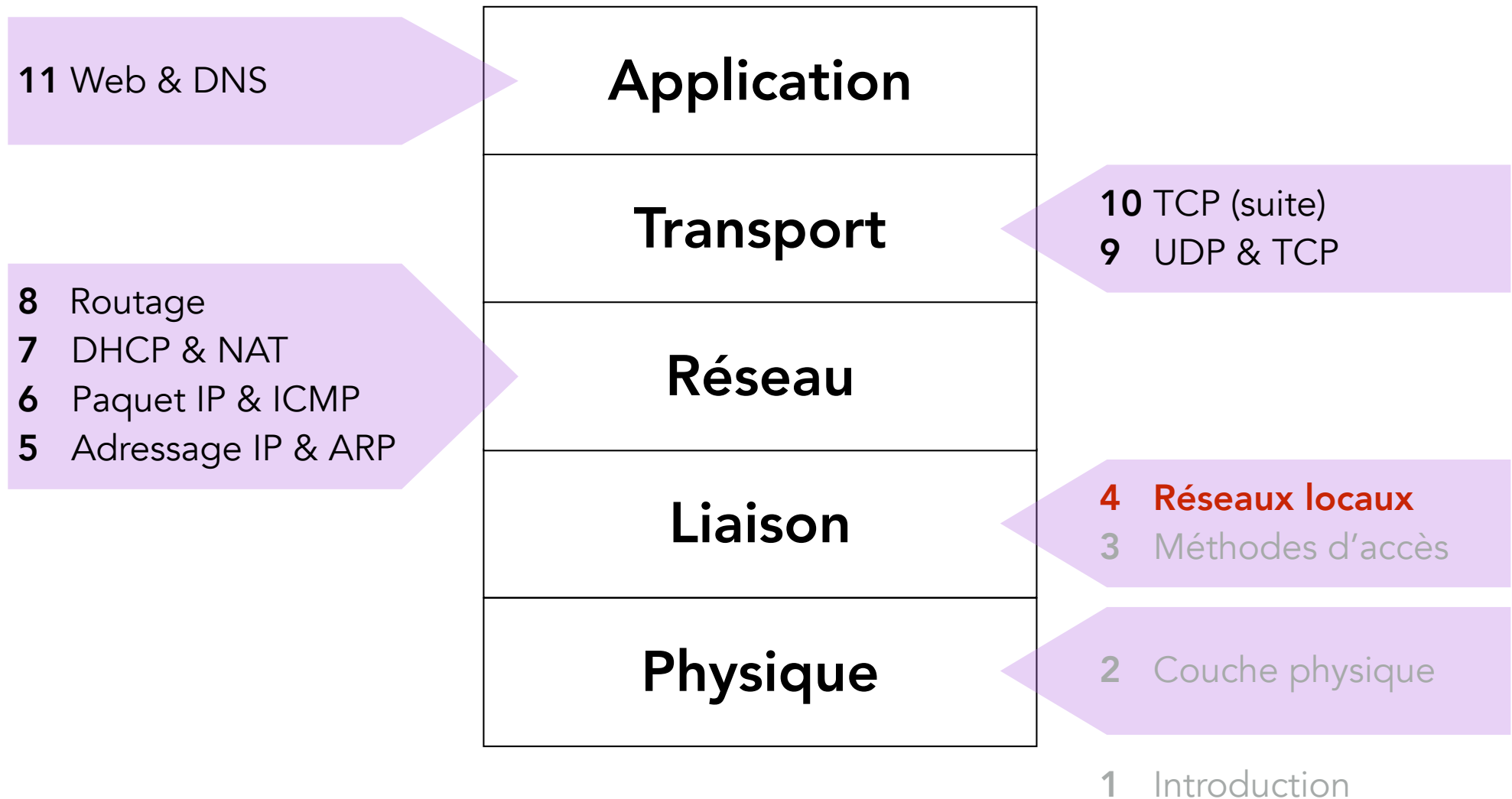
UE LU3IN033 Réseaux
2025-2026

Bruno Baynat

Bruno.Baynat@sorbonne-universite.fr



Programme de l'UE LU3IN033



Plan du cours

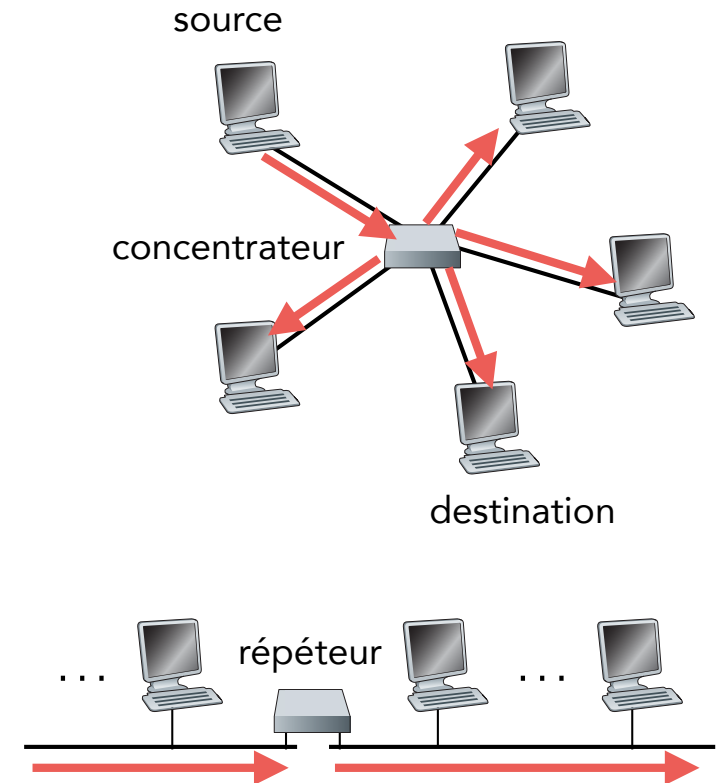
- Domaine de collision vs domaine de diffusion
- Concentrateurs vs commutateurs
- Techniques et protocoles propres aux commutateurs
 - Auto-apprentissage
 - STP (construction d'un arbre couvrant)
 - Cut-through switching
 - VLAN
- VLANs

LAN

- Définition
 - Un LAN (*Local Area Network*) est un réseau informatique constitué d'un ensemble de machines connectées au moyen de liaisons physiques (filaires ou sans fil) sur une zone géographique restreinte, et utilisant des protocoles de communication communs
- Un LAN est généralement constitué de plusieurs sous-réseaux physiques (segments) connectés entre eux par des équipements d'interconnexion
 - Les concentrateurs (*hubs*)
 - agissent au niveau de la couche physique (1)
 - Les commutateurs (*bridges* ou *switchs*)
 - agissent au niveau de la couche liaison (2)
 - Les routeurs (*routers*)
 - agissent au niveau de la couche réseau (3)

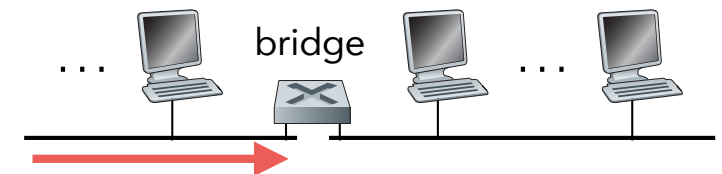
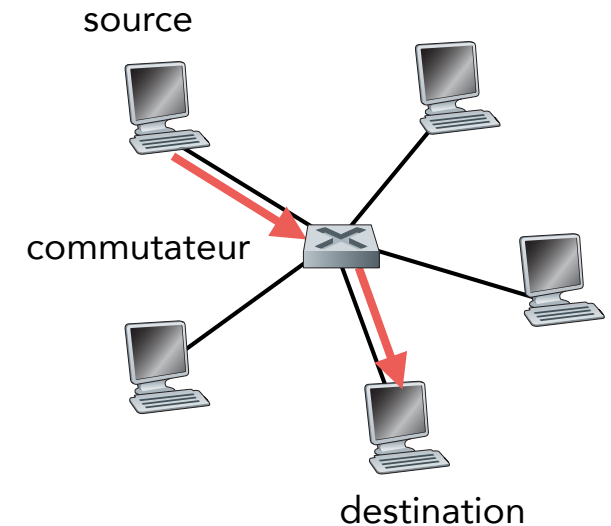
Concentrateurs

- Les **concentrateurs** (*hubs*)
 - agissent au niveau de la couche physique (1)
 - lorsqu'une trame est reçue sur un des ports, le signal correspondant est retransmis sur tous les autres ports
- Les **répéteurs** (*repeaters*)
 - concentrateurs à 2 ports permettant de relier 2 segments Ethernet (bus)
- Concentrateurs et répéteurs étendent le domaine de collision
- Inconvénients
 - Débit
 - augmentation du nombre de stations connectées
 - diminution de la « bande passante » (débit) allouée à chaque station
 - Délai
 - augmentation du nombre de collisions
 - retards de transmissions (*exponential backoff*)
 - Efficacité
 - chaque trame est retransmise sur l'ensemble du réseau
 - surcharge de trafic



Commutateurs

- Les **commutateurs** (*bridges* ou *switchs*)
 - agissent au niveau de la couche liaison (2)
 - lorsqu'une trame est reçue sur un des ports, le commutateur la renvoie uniquement sur le port sur lequel la destination est connectée (phase d'apprentissage nécessaire)
- Le **bridge** est l'ancêtre du commutateur
 - équipement de connexion à 2 (ou 4) ports permettant de relier entre eux des segments Ethernet (domaines de collision)
- Le **switch** est un commutateur moderne ayant plusieurs dizaines (voire centaines) de ports
 - remplace les hubs pour connecter les stations d'un réseau Ethernet
 - « Ethernet commuté »
- Fonctionnalités communes aux *bridges* et aux *switchs*
 - **CSMA/CD**
 - **auto-apprentissage**
 - **protocole STP** (*Spanning Tree Protocol*)
 - **store & forward** ou **cut-through switching**
- Equipements transparents
 - les stations n'ont pas connaissance de leur existence
- Equipements plug and play
 - ne nécessitent aucune configuration



Domaine de collision vs diffusion

- Domaine de collision

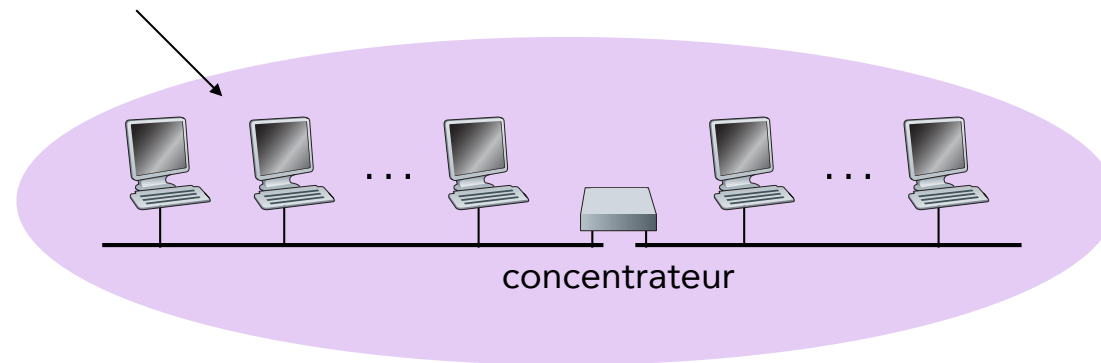
- Zone logique au sein de laquelle des transmissions simultanées se brouillent mutuellement : collisions
 - Les **concentrateurs** (*hubs*) regroupent toutes les stations en un seul domaine de collision
 - Les **commutateurs** (*bridges* ou *switchs*) et les **routeurs** divisent un réseau en plusieurs domaines de collision

- Domaine de diffusion

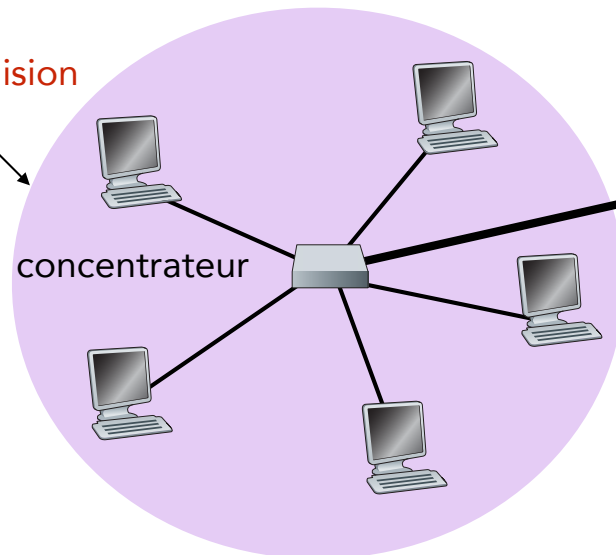
- Zone logique au sein de laquelle une même trame peut être diffusée (« broadcastée ») à toutes les stations de la zone
 - Les **concentrateurs** et les **commutateurs** regroupent toutes les stations en un seul domaine de diffusion
 - Les **routeurs** divisent un réseau en plusieurs domaines de diffusion
 - Les **VLANs** font de même

Domaine de collision

domaine de collision

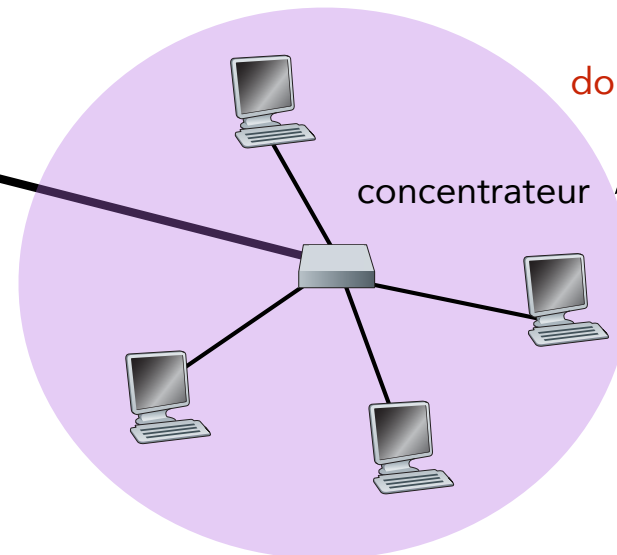


domaine de collision

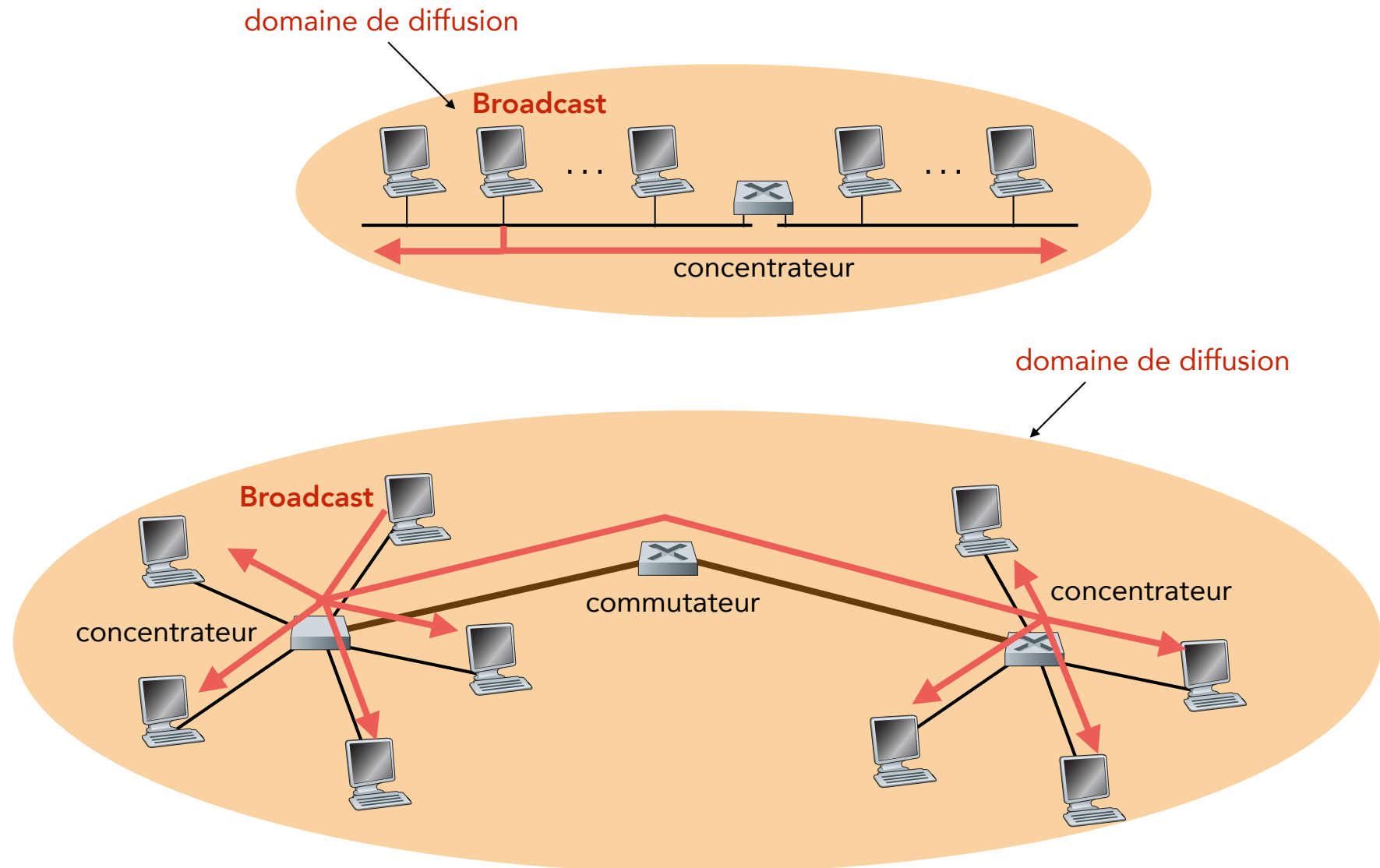


commutateur

domaine de collision



Domaine de diffusion



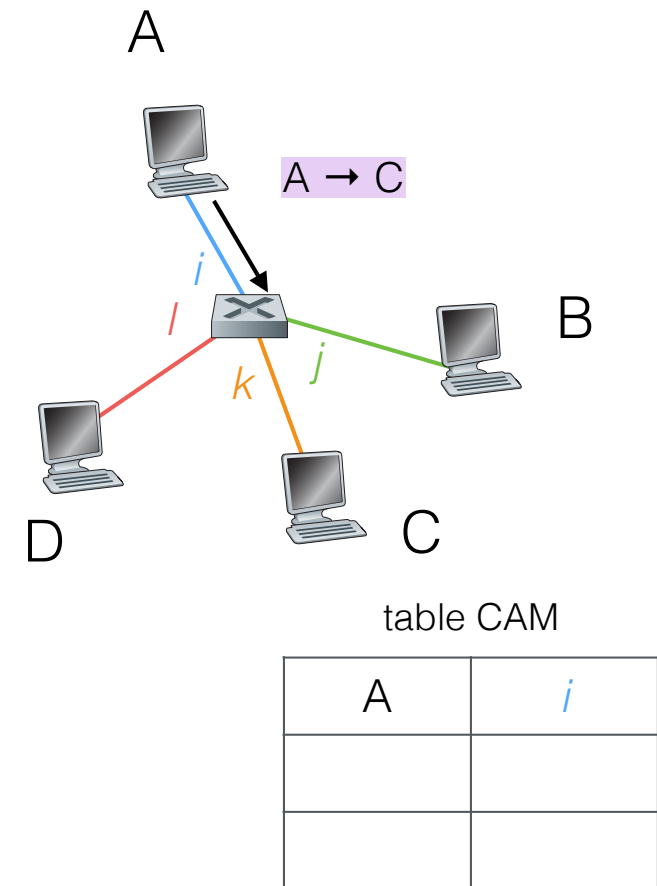
Commutateurs



Auto-apprentissage

Peuplement de la table CAM

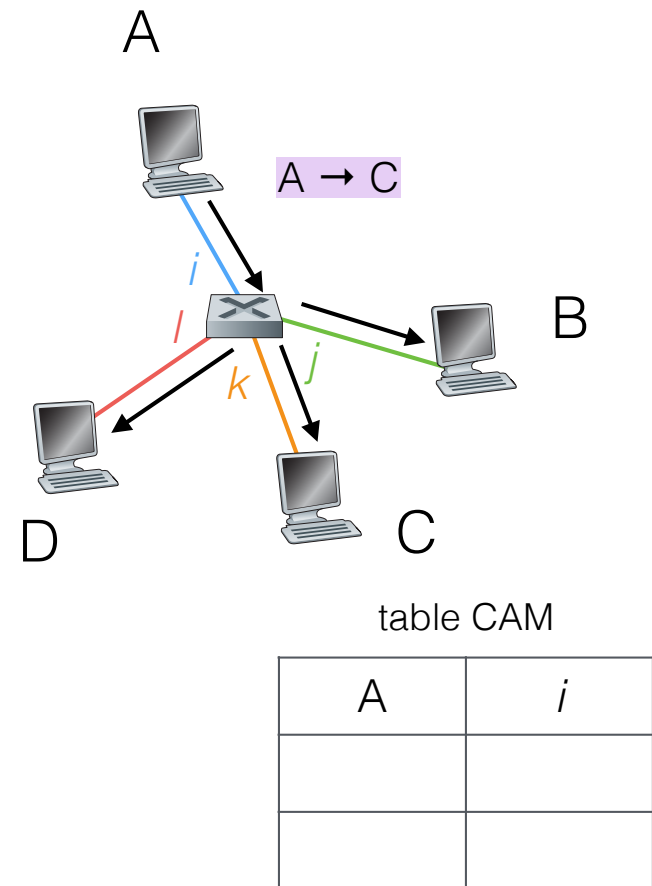
- Lorsqu'une trame arrive sur le port d'entrée d'un commutateur
 - inspecte l'adresse MAC source
 - associe cette adresse au port d'entrée de la trame
 - crée une entrée dans la **table CAM** (Content Addressable Memory) ou **table MAC**
 - associe un TTL (*aging time*) à cette entrée permettant
 - de maintenir la taille de la table CAM petite
 - de prendre en compte
 - les changements de topologie
 - les stations qui bougent ou qui deviennent inactives



Auto-apprentissage

Destinations inconnues

- Si la destination n'est pas connue (n'est pas présente dans sa table CAM)
 - envoie la trame sur tous les ports (à l'exception du port d'entrée) : **inondation**



Auto-apprentissage

Destination connue

- Si la destination est connue (est présente dans sa table CAM)
 - envoie la trame uniquement sur le port indiqué pour cette destination par la table CAM (si différent du port d'entrée)

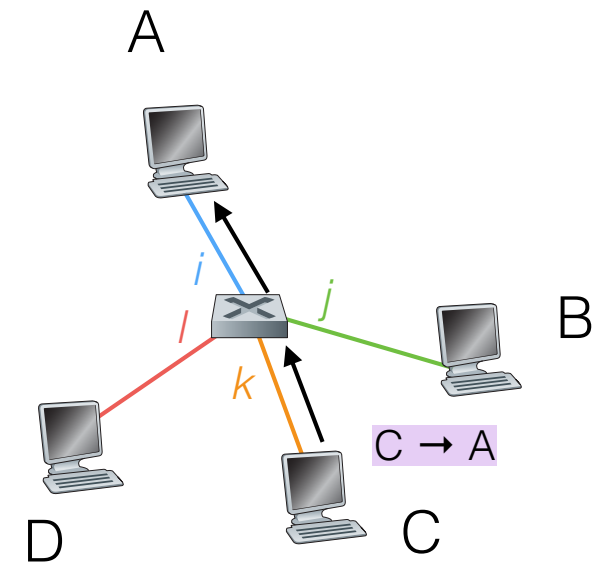


table CAM

A	i
C	k

Peuplement des tables CAM

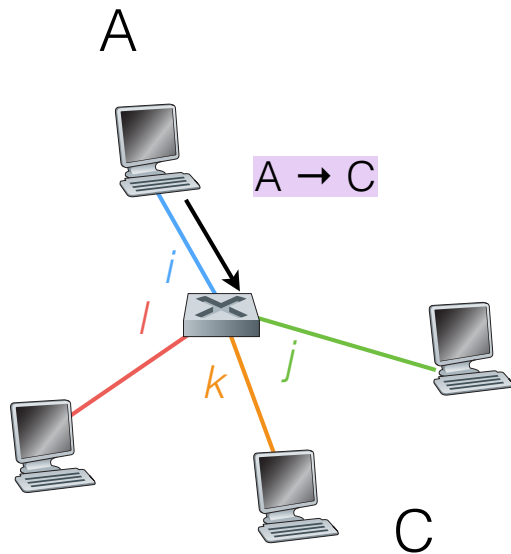


table CAM

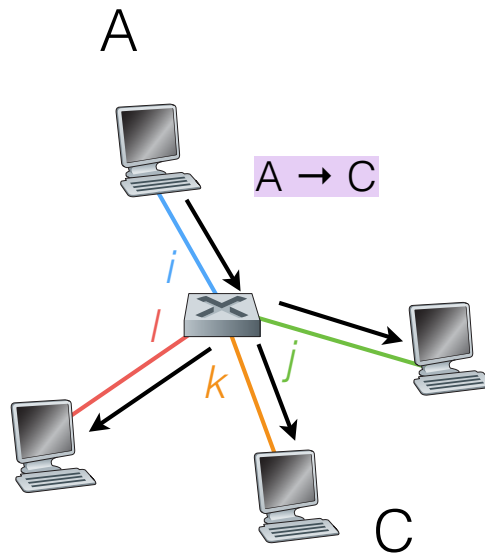


table CAM

A	i

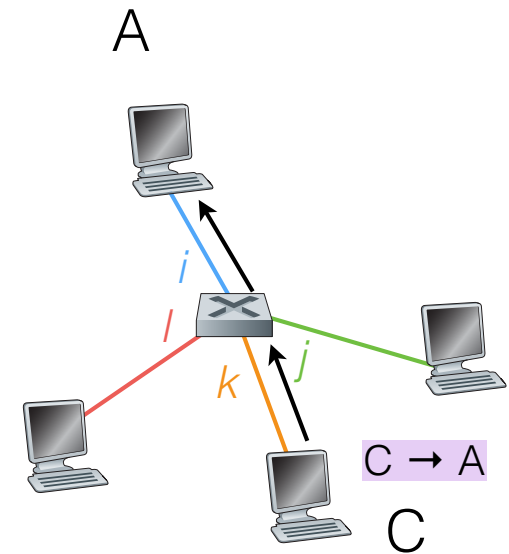
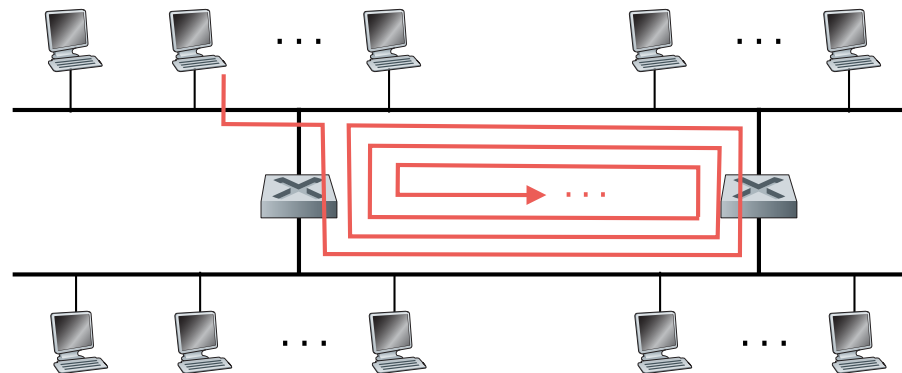


table CAM

A	i
C	k

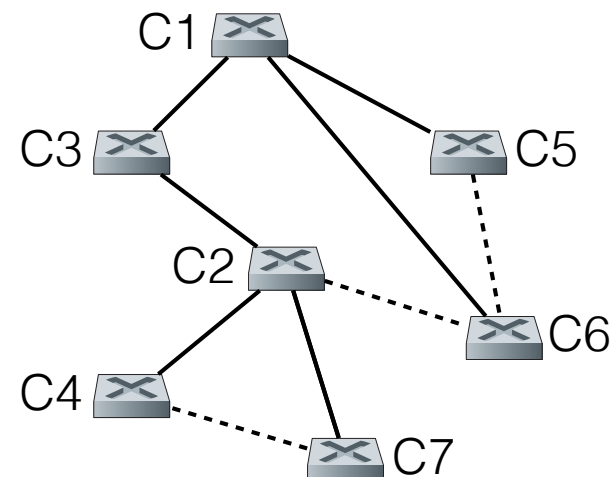
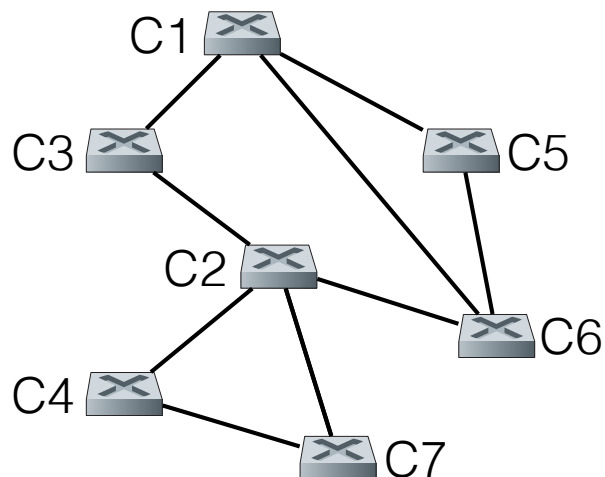
Inondation et boucles

- Les commutateurs ont parfois besoin d'inonder
 - les trames à destination d'adresses inconnues (non présentes dans la table CAM)
 - les trames à destination de l'adresse de broadcast (FF:FF:FF:FF:FF:FF)
- Le réseau peut contenir des boucles
 - involontaires : erreurs de câblage
 - volontaires : redondance pour résister aux pannes
- L'inondation des trames peut donc entraîner des tempêtes de broadcasts



Arbre couvrant

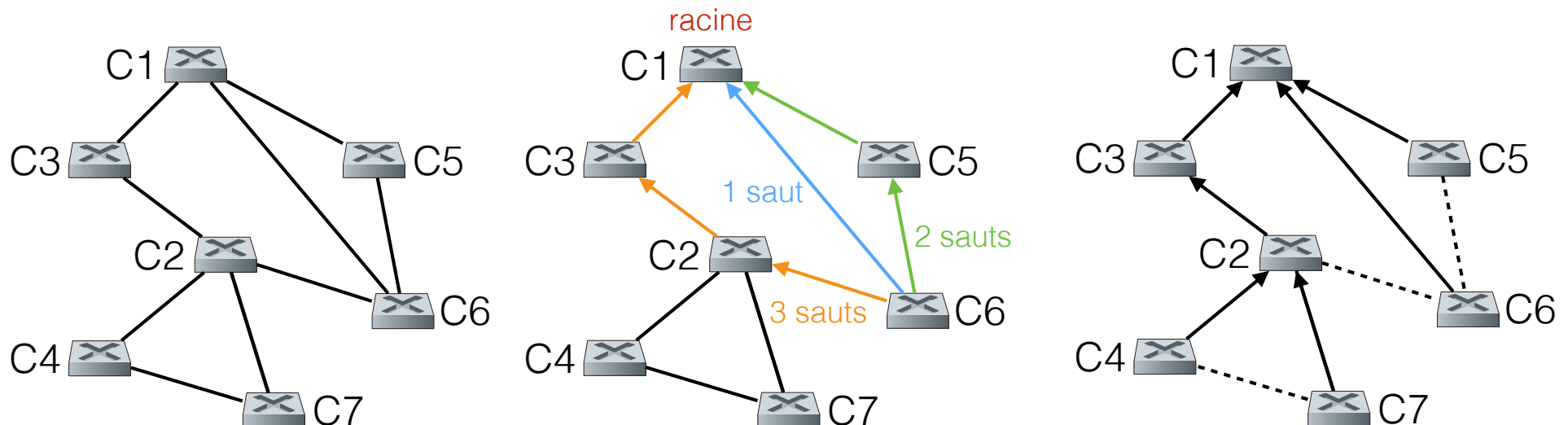
- Objectif : « casser » les boucles d'acheminement
 - en évitant certains liens
 - sans rendre aucune destination inaccessible
- Solution : construire sur la topologie du réseau un **arbre couvrant**
 - en choisissant certains liens
 - afin d'avoir un chemin unique entre toutes paires de noeuds



Principes du protocole STP

- *Spanning Tree Protocol*
- Choix d'une racine
 - basé sur les identifiants des commutateurs
- Choix des liens de l'arbre couvrant
 - chaque commutateur identifie le lien auquel il est connecté qui lui permet de joindre la racine le long du « plus court chemin »

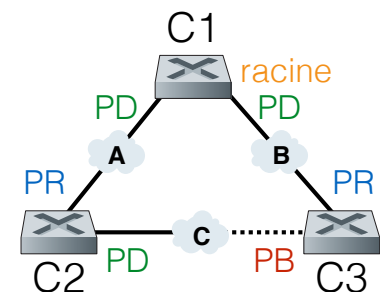
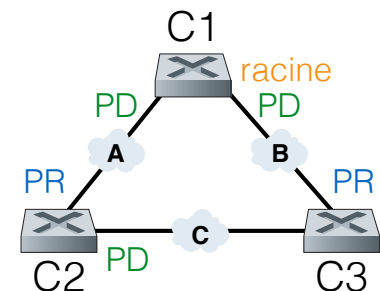
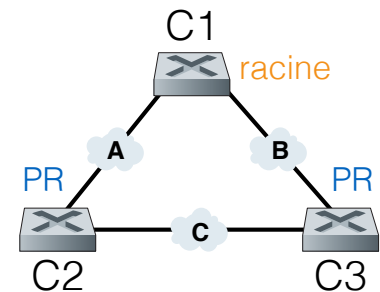
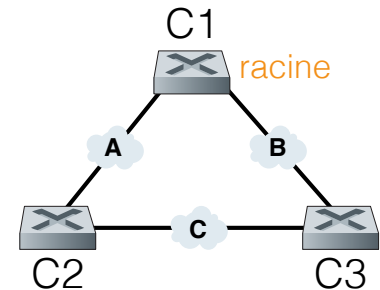
débit	coût
10 Mbit/s	100
100 Mbit/s	19
1 Gbit/s	4
10 Gbit/s	2
100 Gbit/s	1



Etapes du protocole STP

- 4 étapes

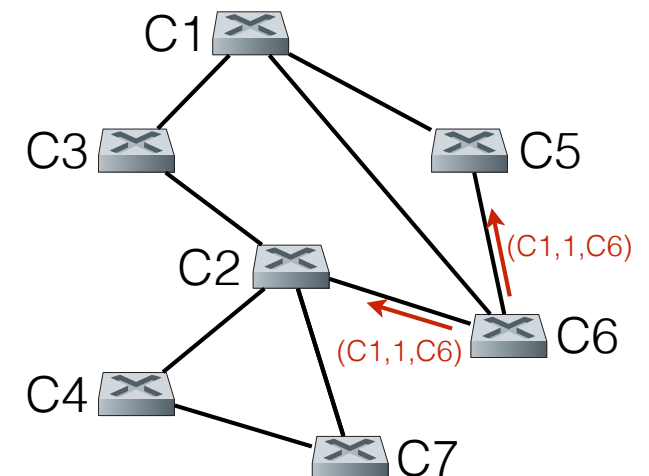
- Election du commutateur racine
 - commutateur ayant le plus petit identifiant
 - identifiant = adresse mac (du commutateur) + priorité (réglable)
- Détermination des ports racines
 - chaque commutateur (autre que la racine) identifie le port « racine » qui lui permet de joindre la racine le long du plus court chemin
 - en cas d'égalité choisir le chemin passant par le voisin ayant le plus petit identifiant
- Détermination des ports désignés
 - pour chaque segment reliant plusieurs commutateurs, le port « désigné » est celui qui le mène à la racine le long du plus court chemin
- Blocage des autres ports
 - tous les ports qui ne sont ni racines ni désignés sont bloqués
 - aucun message de données ne sera retransmis sur un port bloqué



Algorithme STP

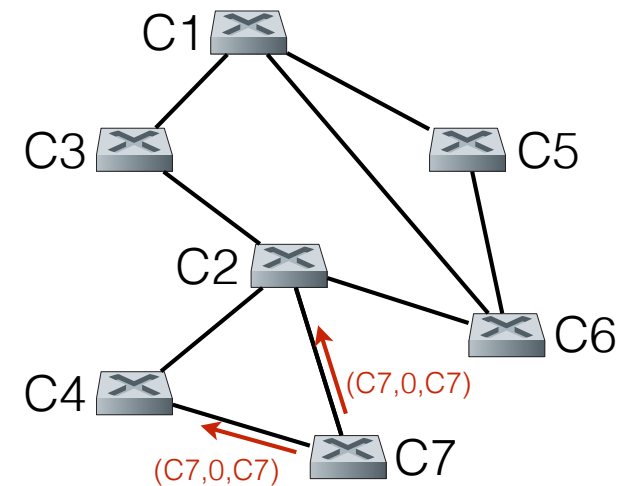
- Algorithme distribué
- Les commutateurs s'échangent périodiquement des messages BPDU (*Bridge Protocol Data Unit*)
 - encapsulés dans des trames IEEE 802.3
 - envoyées à l'adresse MAC multicast 01:80:C2:00:00:00
 - 3 types
 - BPDU de configuration (CBPDU)
 - BPDU de notification de changement de topologie (TCN)
 - BPDU d'acquittement de changement de topologie (TCA)
- Les ports d'un commutateur qui s'allume passent par 3 phases
 - *Listening* (15 secondes par défaut)
 - *Learning* (15 secondes par défaut)
 - *Forwarding / Blocking*
- Message CBPDU : X envoie (Y, d, X)
 - sur tous ses ports (autre que le port racine)
 - X pense que Y est la racine
 - et que d est la distance qui le sépare de Y

Phase	Envoi BPDU	Auto-apprentissage	Envoi données
Listening	oui	non	non
Learning	oui	oui	non
Forwarding / Blocking	oui	oui	oui / non



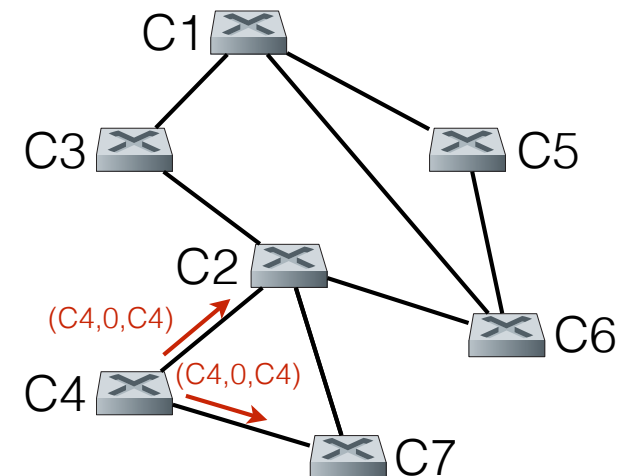
Exemple

- Les commutateurs C7 et C4 s'allument et considèrent tous les deux être la racine
 - C7 envoie (C7, 0, C7) sur tous ses ports
 - C4 envoie (C4, 0, C4) sur tous ses ports
- C7 reçoit le message (C4, 0, C4) de C4
 - commence à considérer C4 comme étant la racine (car $\text{id } C4 < \text{id } C7$)
 - calcule la distance du chemin vers C4 : $d = 1$
 - marque son port vers C4 comme port racine
 - C7 envoie (C4, 1, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)
- C7 reçoit le message (C1, 2, C2) de C2
 - considère C1 comme la racine
 - calcule la distance du chemin vers C1 : $d = 3$
 - marque son port vers C2 comme port racine
 - C7 envoie (C1, 3, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)



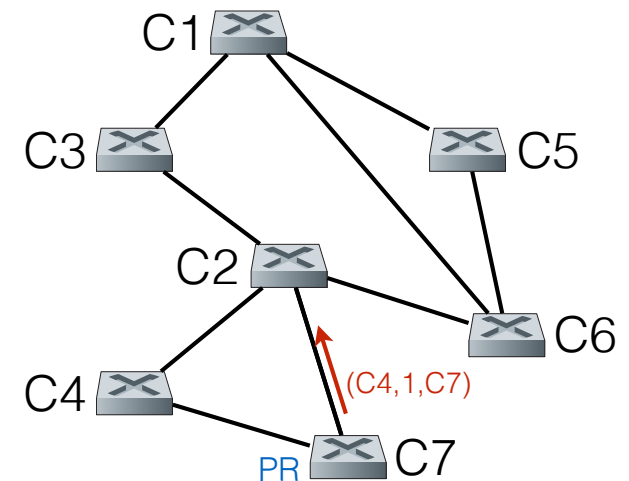
Exemple

- Les commutateurs C7 et C4 s'allument et considèrent tous les deux être la racine
 - C7 envoie (C7, 0, C7) sur tous ses ports
 - C4 envoie (C4, 0, C4) sur tous ses ports
- C7 reçoit le message (C4, 0, C4) de C4
 - commence à considérer C4 comme étant la racine (car $\text{id } C4 < \text{id } C7$)
 - calcule la distance du chemin vers C4 : $d = 1$
 - marque son port vers C4 comme port racine
 - C7 envoie (C4, 1, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)
- C7 reçoit le message (C1, 2, C2) de C2
 - considère C1 comme la racine
 - calcule la distance du chemin vers C1 : $d = 3$
 - marque son port vers C2 comme port racine
 - C7 envoie (C1, 3, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)



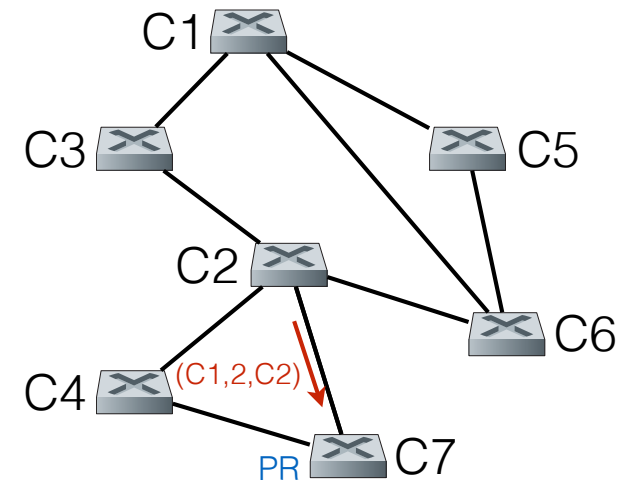
Exemple

- Les commutateurs C7 et C4 s'allument et considèrent tous les deux être la racine
 - C7 envoie (C7, 0, C7) sur tous ses ports
 - C4 envoie (C4, 0, C4) sur tous ses ports
- C7 reçoit le message (C4, 0, C4) de C4
 - commence à considérer C4 comme étant la racine (car $\text{id } C4 < \text{id } C7$)
 - calcule la distance du chemin vers C4 : $d = 1$
 - marque son port vers C4 comme port racine
 - C7 envoie (C4, 1, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)
- C7 reçoit le message (C1, 2, C2) de C2
 - considère C1 comme la racine
 - calcule la distance du chemin vers C1 : $d = 3$
 - marque son port vers C2 comme port racine
 - C7 envoie (C1, 3, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)



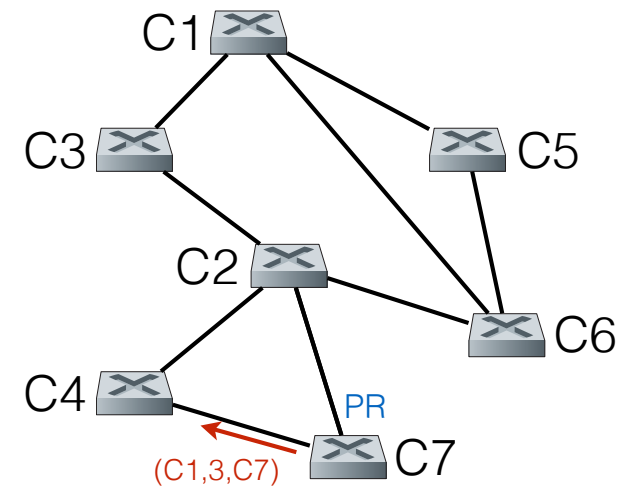
Exemple

- Les commutateurs C7 et C4 s'allument et considèrent tous les deux être la racine
 - C7 envoie (C7, 0, C7) sur tous ses ports
 - C4 envoie (C4, 0, C4) sur tous ses ports
- C7 reçoit le message (C4, 0, C4) de C4
 - commence à considérer C4 comme étant la racine (car $\text{id } C4 < \text{id } C7$)
 - calcule la distance du chemin vers C4 : $d = 1$
 - marque son port vers C4 comme port racine
 - C7 envoie (C4, 1, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)
- C7 reçoit le message (C1, 2, C2) de C2
 - considère C1 comme la racine
 - calcule la distance du chemin vers C1 : $d = 3$
 - marque son port vers C2 comme port racine
 - C7 envoie (C1, 3, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)



Exemple

- Les commutateurs C7 et C4 s'allument et considèrent tous les deux être la racine
 - C7 envoie (C7, 0, C7) sur tous ses ports
 - C4 envoie (C4, 0, C4) sur tous ses ports
- C7 reçoit le message (C4, 0, C4) de C4
 - commence à considérer C4 comme étant la racine (car $\text{id } C4 < \text{id } C7$)
 - calcule la distance du chemin vers C4 : $d = 1$
 - marque son port vers C4 comme port racine
 - C7 envoie (C4, 1, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)
- C7 reçoit le message (C1, 2, C2) de C2
 - considère C1 comme la racine
 - calcule la distance du chemin vers C1 : $d = 3$
 - marque son port vers C2 comme port racine
 - C7 envoie (C1, 3, C7) sur tous ses ports (autre que le port racine)



Algorithme STP

- L'algorithme doit réagir aux pannes ou aux changements de configuration
 - panne d'un commutateur ou d'un lien
 - changement de priorité d'un commutateur
- Les commutateurs envoient périodiquement leurs messages BPDU de configuration
 - la racine continue à s'annoncer comme étant la racine
 - en envoyant (toutes les 2 secondes) des messages CBPDU
 - les autres commutateurs continuent
 - à calculer la distance qui les séparent de la racine
 - à propager les messages CBPDU sur tous leurs ports (désignés)
- Détection des pannes sur expiration de TTL
 - l'état des ports d'un commutateur est associé à une durée « *max age* » (20 secondes par défaut)
 - l'absence de réception de messages CBPDU pendant cette durée provoque le recalcul de l'arbre couvrant
 - envoi de messages TCN et TCA
 - repassage par les phases *Listening* et *Learning*

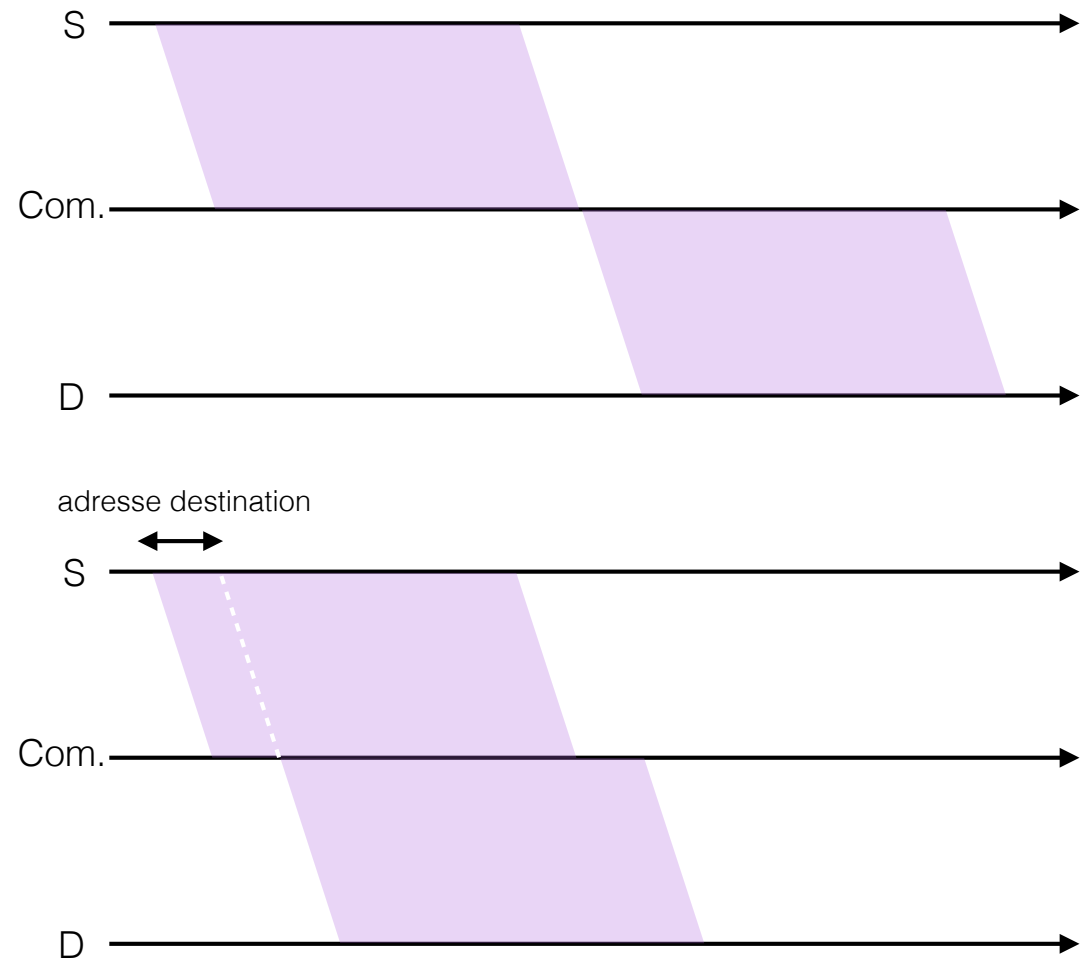
Store & forward vs cut-through

- *Store & forward switching*

- Retransmission lorsque la trame est intégralement reçue et vérifiée
- Inconvénient : coûteux en termes de temps et de mémoire

- *Cut-through switching*

- Retransmission de la trame aussitôt que possible
 - inspection de la table CAM dès que l'adresse destination est reçue
 - retransmission de la trame sur le port de sortie (si le support est libre) sans attendre de l'avoir entièrement reçue
- Inconvénient : propagation des erreurs



Commutateurs vs concentrateurs

Avantages

- Plug-and-play
 - configuration automatique
- Réduction du nombre de collisions
 - augmentation de la portée du réseau
- Filtrage du trafic
 - réduction du trafic inutile
 - préservation de la bande passante
 - meilleure confidentialité
- Elimination des boucles d'acheminement
 - évite les surcharges liées à des trames qui bouclent indéfiniment

Inconvénients

- CSMA/CD
 - plus complexe et plus coûteux (en termes de temps et de mémoire)
 - solution : liens full duplex
- *Store & forward switching*
 - retard dans le traitement des trames
 - solution : *cut-through switching*
- Gestion des tables CAM
 - taille des tables
 - solution : TTL pour limiter leur taille
- Délai de convergence de l'algorithme STP
 - plusieurs dizaines de secondes
 - solution : Rapid STP (RSTP)

VLAN



VLAN : LAN Virtuels

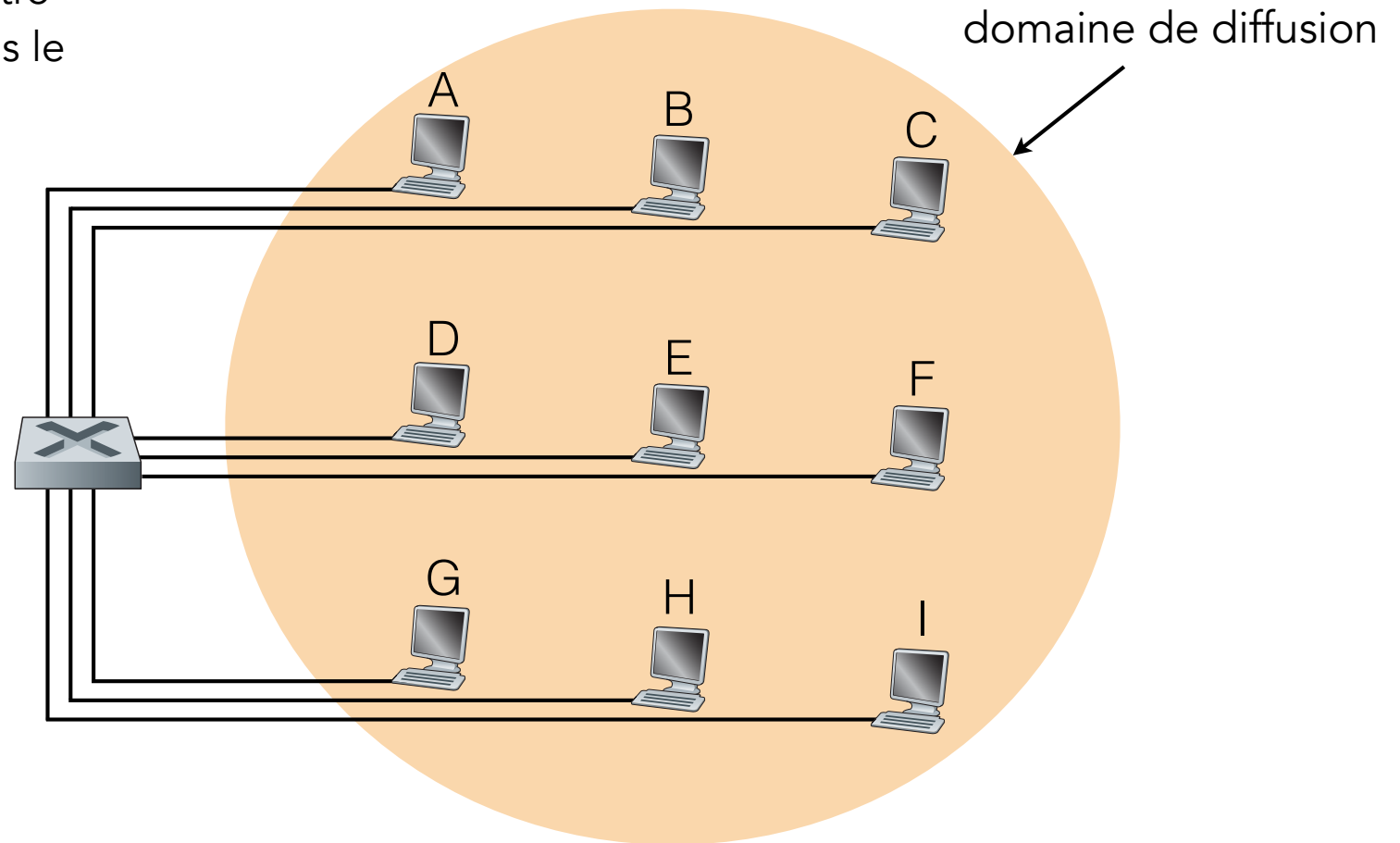
- Les commutateurs Ethernet
 - divisent le réseau en plusieurs sous-domaines de collision
 - étendent le réseau en un seul domaine de diffusion
 - une trame inondée est reçue par toutes les stations du réseau
- Charge
 - Les trames inondées augmentent la charge du réseau
 - Compartimenter les trafics permettrait de préserver la bande passante
- Sécurité
 - Toutes les stations voient passer tout le trafic inondé
 - Compartimenter les trafics permettrait d'améliorer la confidentialité
- Les VLANs permettent de subdiviser le réseau en plusieurs sous-domaines de diffusion
 - isolant les trafics au sein de chaque sous-domaine

VLAN : Réorganisation logique du réseau

- Découper le réseau en sous-domaines de diffusion, chacun correspondant à un VLAN, permet de
 - limiter la portée des trames inondées
 - à l'intérieur d'un VLAN uniquement
 - réduire la taille des tables CAM
 - un switch possède une table CAM par VLAN (qui le traverse)
 - limiter la complexité du STP
 - une instance du protocole STP par VLAN
- Réorganisation logique des stations (utilisateurs)
 - regroupement basé sur des critères logiques
 - appartenance au même groupe / service / département
 - niveau de sécurité
 - indépendamment de leurs positions physiques
 - sans recâblage

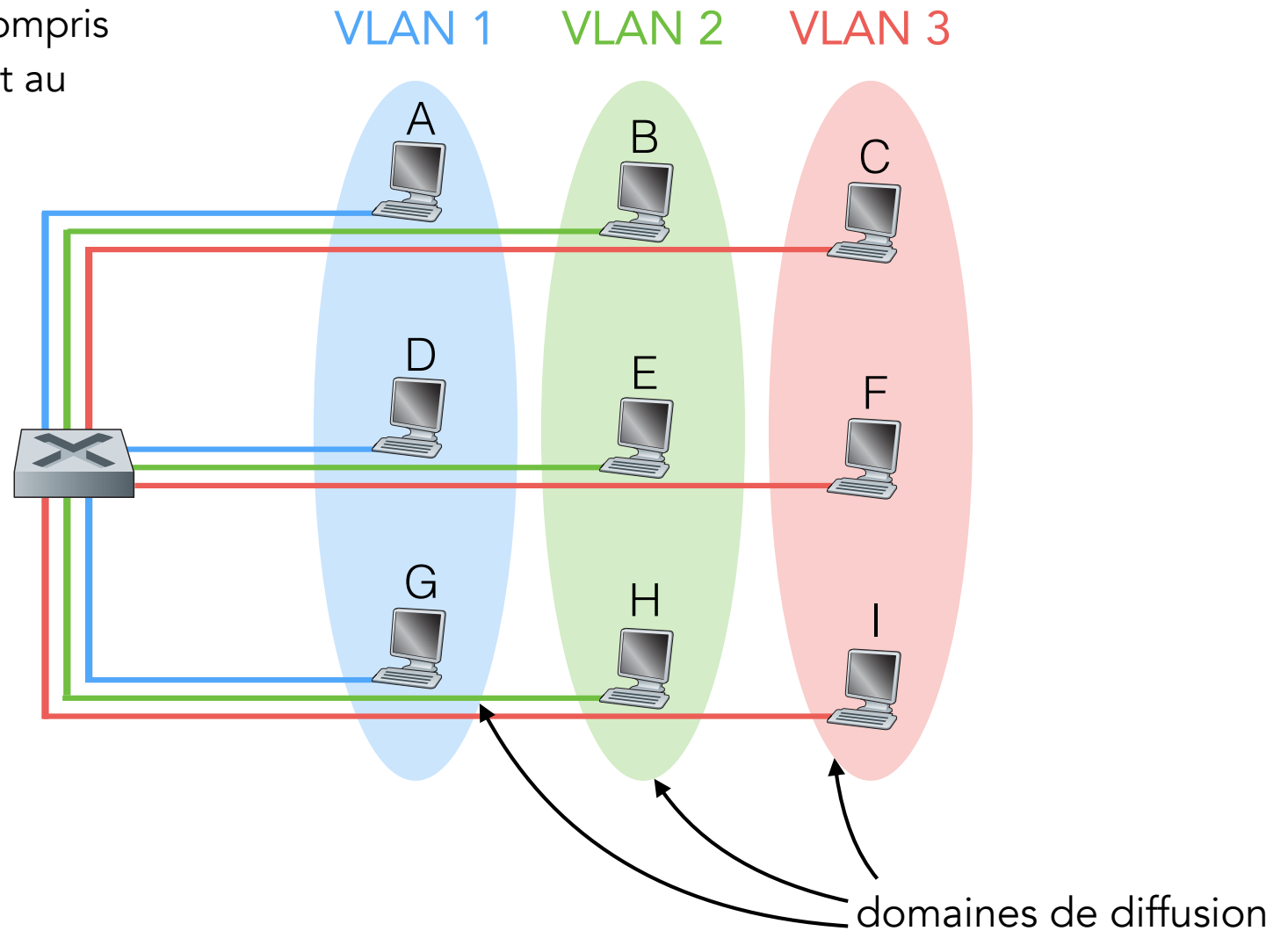
Domaine de diffusion

Les trames peuvent être inondées partout dans le réseau



VLANs

Toutes les trames y compris de broadcast circulent au sein d'un seul VLAN



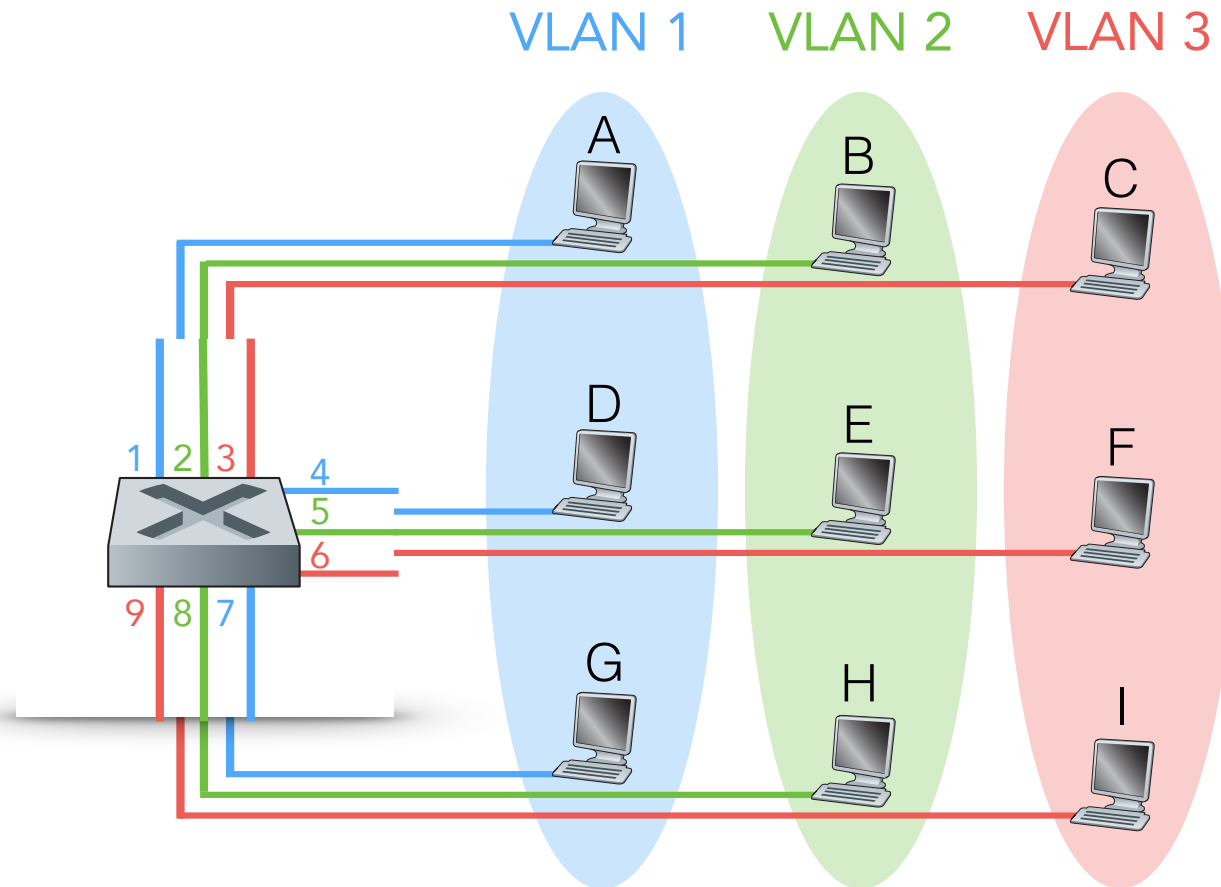
Appartenance aux VLANS

- Les commutateurs sont configurés avec une table de VLAN
 - indiquant à quel VLAN appartient une trame
- Appartenance des trames aux VLAN
 - Statique
 - définie par le port du commutateur
 - Dynamique
 - définie par l'adresse MAC source des trames
 - définie par le champ Type des trames
 - définie par l'adresse IP source du paquet encapsulé
 - définie par l'application véhiculée dans le paquet encapsulé

VLANs

Table statique construite manuellement par l'administrateur

Port	VLAN
1	1
2	2
3	3
4	1
5	2
6	3
7	1
8	2
9	3



Les trames reçues sur le port 1 sont transmises uniquement sur les ports 4 et 7

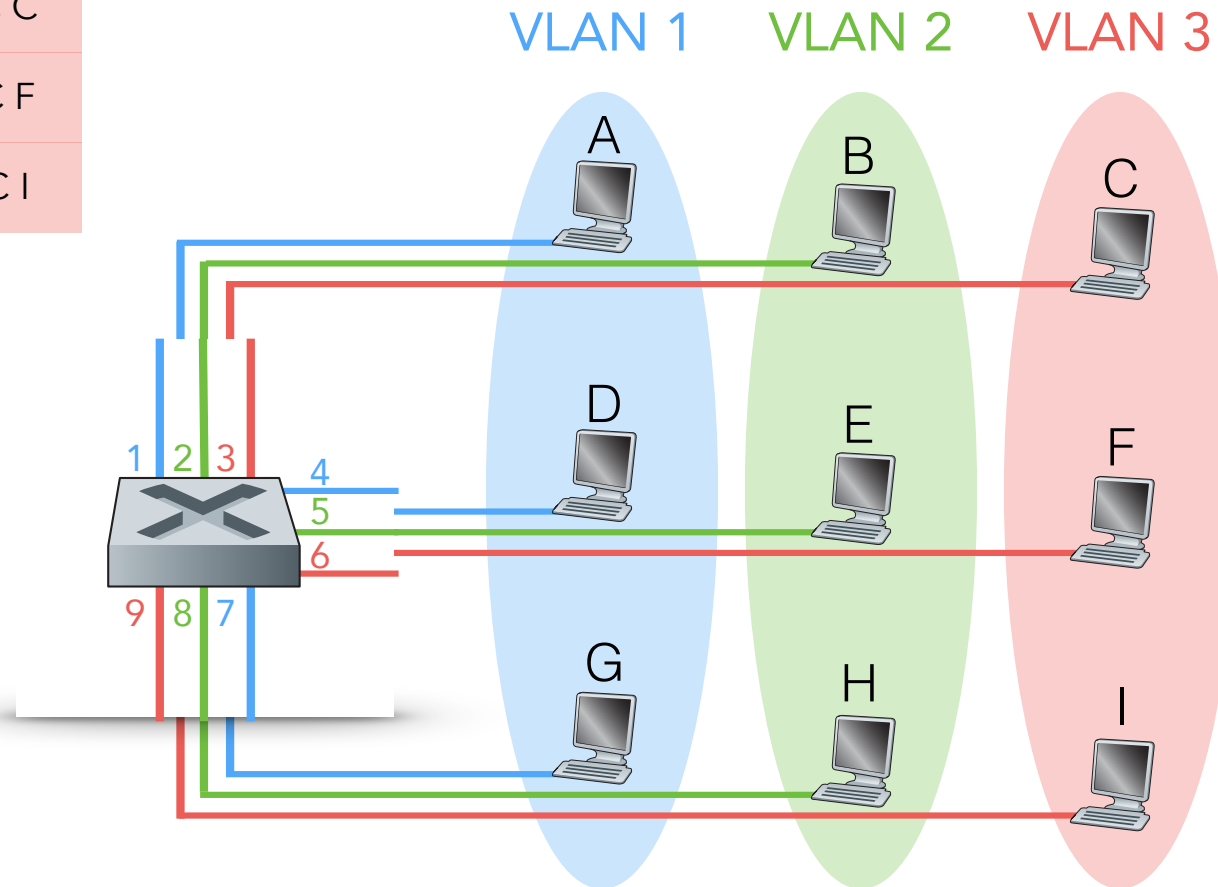
Table statique construite
manuellement par l'administrateur

VLAN 1	VLAN 2	VLAN 3
MAC A	MAC B	MAC C
MAC D	MAC E	MAC F
MAC G	MAC H	MAC I

Table dynamique construite
par le commutateur

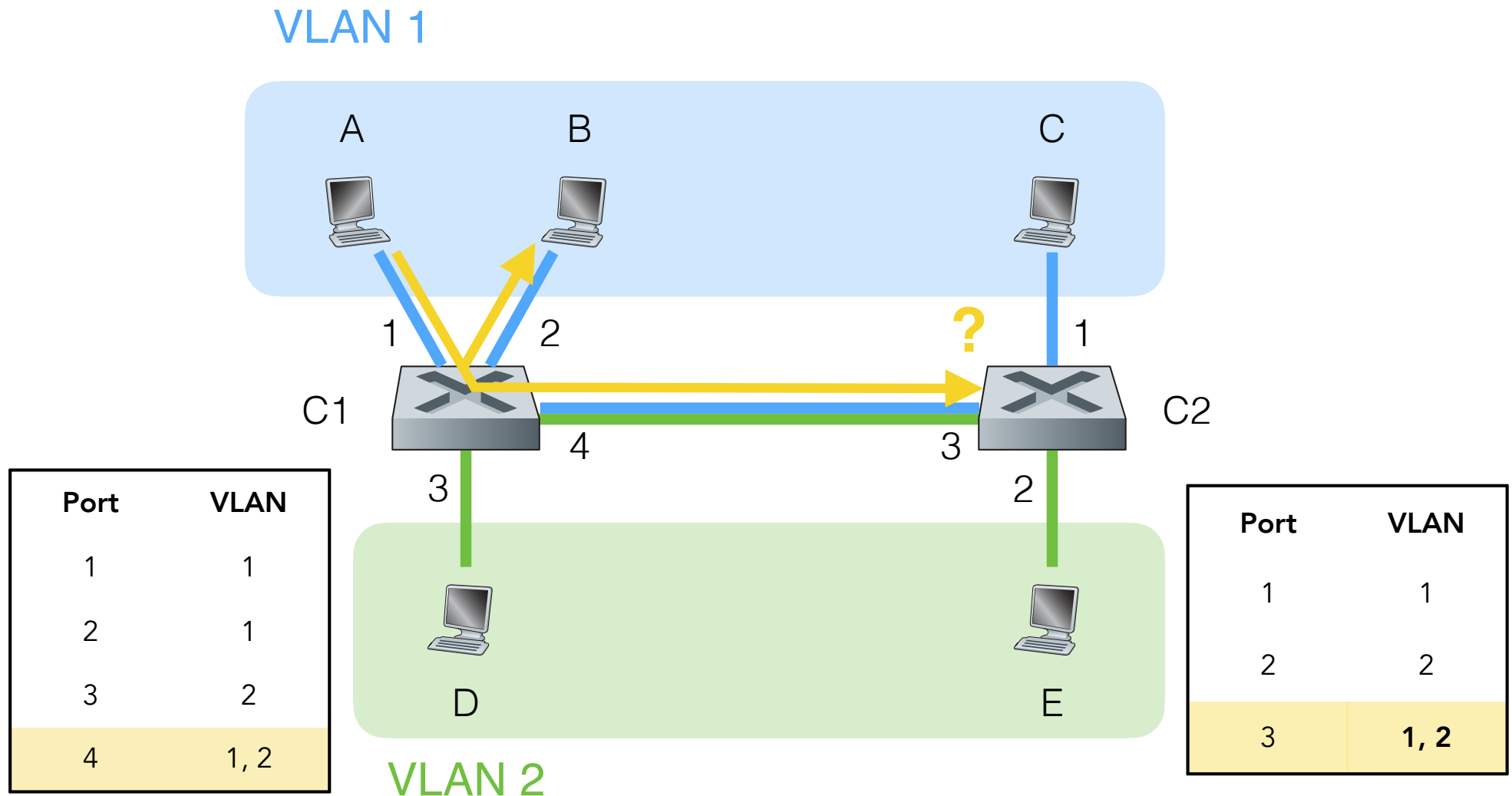
Port	VLAN
1	1
2	2
3	3
4	1
5	2
6	3
7	1
8	2
9	3

VLANs



L'association des ports aux VLAN se fait sur réception des premières trames

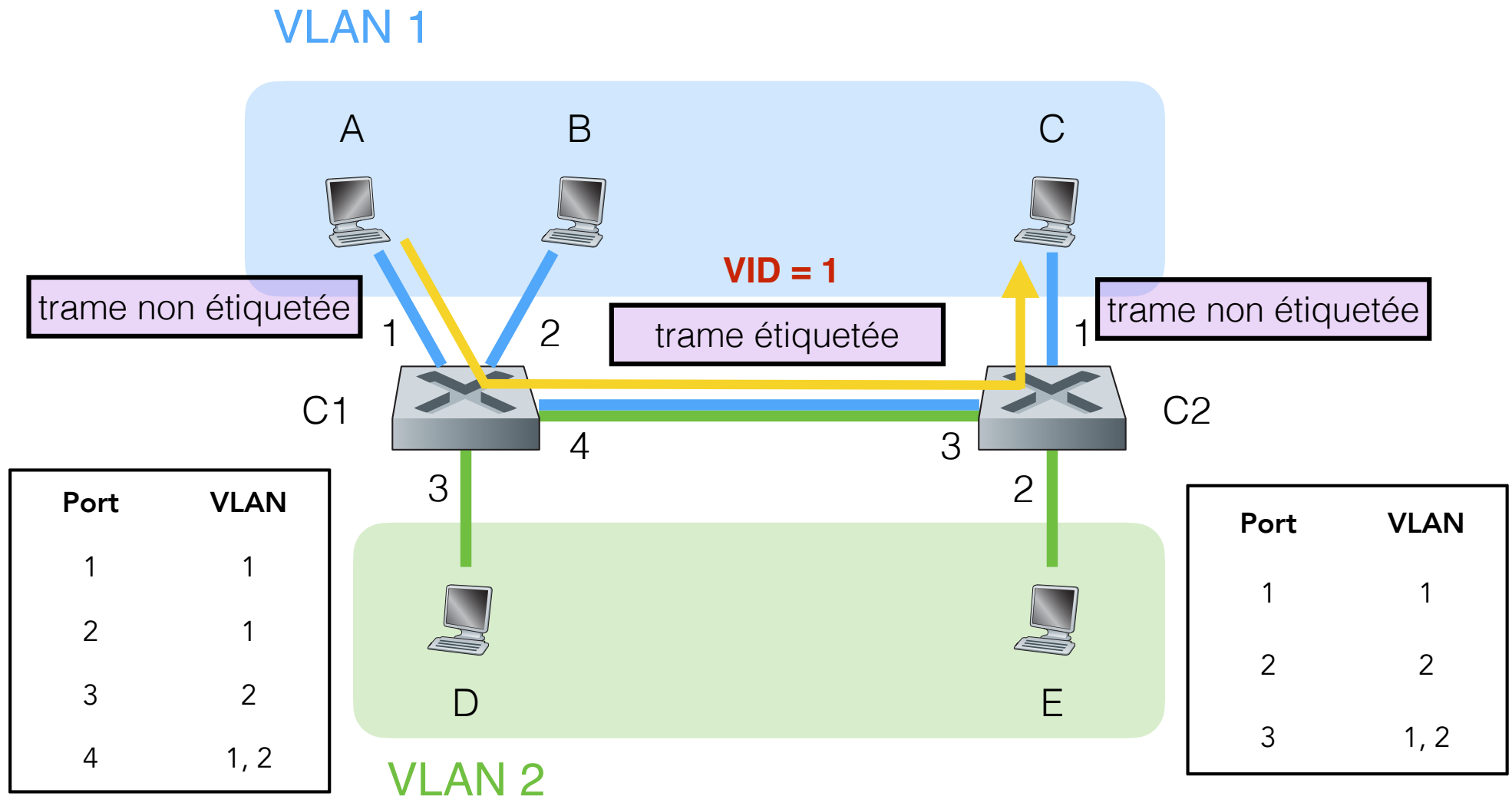
Interconnexion de commutateurs



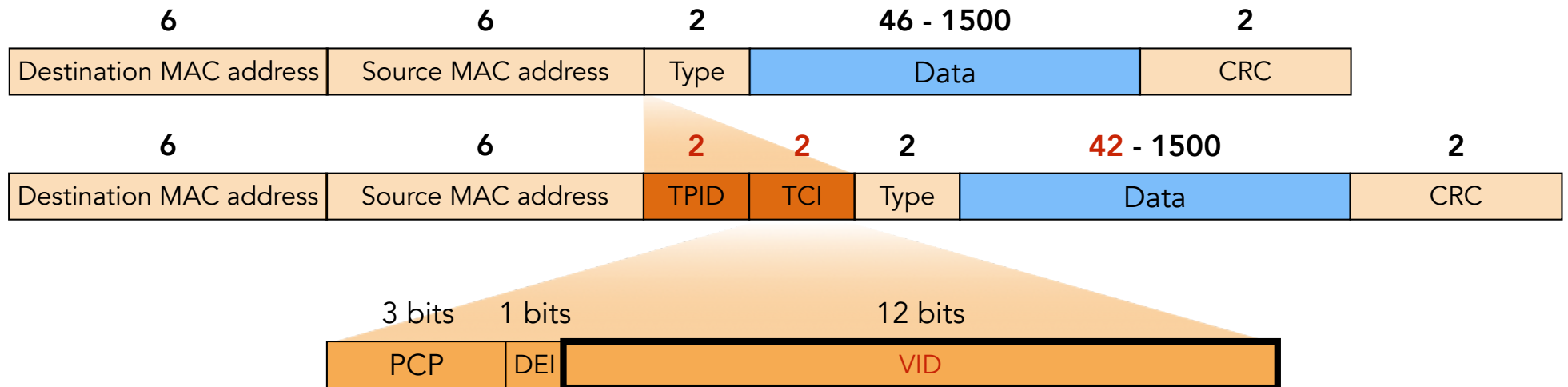
Transfert des trames entre deux commutateurs

- Ajouter deux liaisons physiques entre les deux commutateurs
 - une liaison par VLAN
 - simple mais coûteux
- Ajouter l'association (Adresse MAC, VLAN) dans les commutateurs
 - chaque commutateur doit gérer les 2 types de tables de VLAN
 - configuration laborieuse et fastidieuse
- Ajouter le numéro de VLAN dans l'entête des trames
 - 802.3Q : format des trames VLAN-étiquetées (*tagged*)

Interconnexion de commutateurs



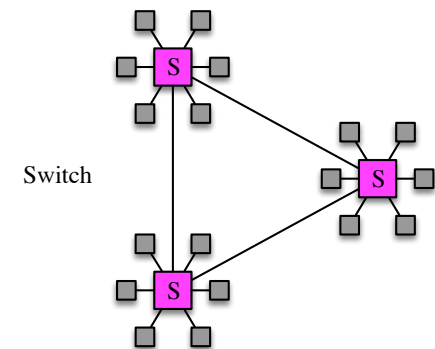
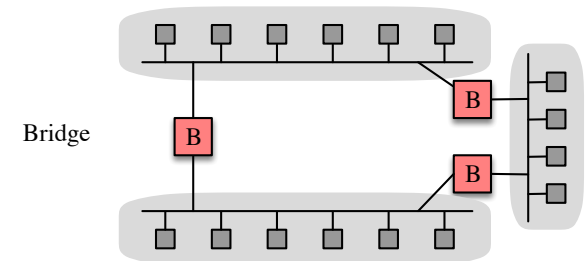
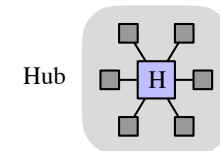
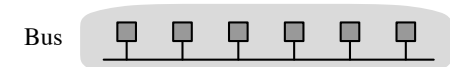
Trames 802.1Q



- Tag Protocol Identifier (TPID)
 - 0x8100 pour les trames IEEE 802.1Q
- Tag Control Information (TCI)
 - Priority Code Point (PCP)
 - permet de classer les trames par priorité (0 à 7)
 - Drop Eligible Indicator (DEI)
 - sert à marquer une trame comme « drop eligible » (éliminable en cas de congestion)
 - VLAN identifier (VID)
 - indique le numéro de VLAN auquel la trame appartient

Evolution des commutateurs

- ANNÉES 70-80**
 - A l'origine les segments Ethernet étaient connectés en **bus**
 - un seul domaine de collision
 - CSMA/CD nécessaire
- ANNÉES 80**
 - Le **hub** a parfois remplacé le bus pour connecter des stations d'un segment Ethernet
 - Un **bridge** (ancêtre du switch) permettait de connecter entre eux plusieurs segments Ethernet (bus ou *hub*)
 - faible nombre de ports (2 ou 4)
 - séparait les segments en plusieurs domaines de collision
 - regroupait les segments en un seul domaine de diffusion
- ANNÉES 90-2000**
 - Un **switch** Ethernet moderne permet de connecter directement entre elles des machines (ou d'autres *switches*)
 - grand nombre de ports (plusieurs dizaines voire centaines)
 - liens full duplex
 - isolation totale des trafics : plus de domaines de collision
 - CSMA/CD devenu inutile (mais toujours implémenté pour rester conforme aux standards et rétrocompatible)



Conclusions

- Interconnecter des segments Ethernet
 - Concentrateurs (*hubs, repeaters*)
 - Commutateurs (*switches, bridges*)
- Domaine de collision vs domaine de diffusion
 - Les commutateurs limitent le domaine de collision...
 - ... mais étendent le domaine de diffusion
- Concepts propres aux commutateurs
 - Auto-apprentissage (table CAM)
 - Arbres couvrants (protocole STP)
 - *Cut-through switching*
 - LANs virtuels (VLANs)
- Les VLANs découpent logiquement le réseau en sous-domaines de diffusion

A faire

- Cours 4
 - à relire attentivement
- Devoir 4 sur Moodle
 - date de rendu : dimanche 5 octobre