

Réseaux et Transmission de Données

6 - Couche Réseau (2)

- *Couche réseau dans Internet*
- *Couche réseau dans ATM*
- *Contrôle de congestion*

Maîtrise EEA

Olivier Fourmaux

Basé sur la 3ème édition du livre du Pr. A. S. Tanenbaum : **Computer Networks**

Olivier.Fourmaux@L2TI.univ-paris13.fr

Maîtrise EEA / RTD-6 / Page 1

Plan du cours de RTD

1. Introduction (3h)
2. Couche Physique (3h)
3. Couche Liaison (3h)
4. Couche d'Accès au Médium (3h)
5. **Couche Réseau (9h)**
6. Couche Transport (6h)
7. Applications (6h)

Olivier.Fourmaux@L2TI.univ-paris13.fr

Maîtrise EEA / RTD-6 / Page 2

Introduction

- Gestion des paquets de la source au destinataire (1ère couche *end-to-end*)
- Applications :
 - **Internet**
 - **Réseaux ATM**
- Contrôle de Congestion :
 - *Résolution des problèmes de gestion de trafic*
 - *Introduction à la QoS (Qualité de Service)*

Olivier.Fourmaux@L2TI.univ-paris13.fr

Maîtrise EEA / RTD-6 / Page 3

Plan - Couche Réseau

- Présentation
- Routage
- *Internetworking*
- **Couche Réseau dans Internet**
- **Couche Réseau dans ATM**
- **Contrôle de Congestion**

Olivier.Fourmaux@L2TI.univ-paris13.fr

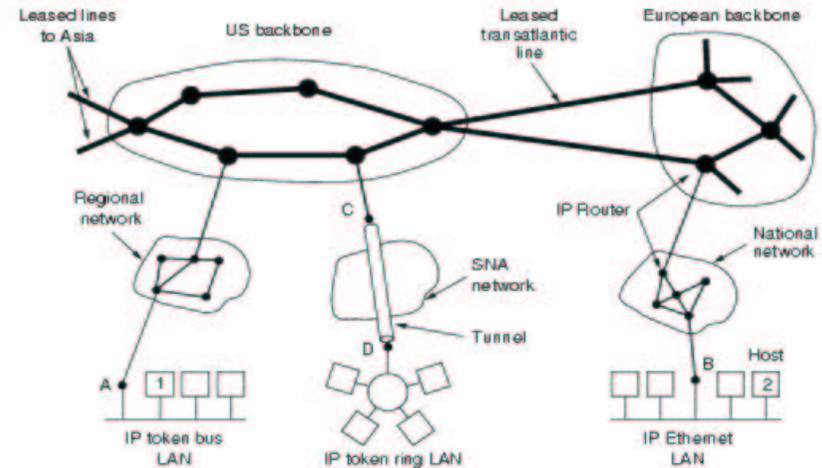
Maîtrise EEA / RTD-6 / Page 4

Plan - Couche Réseau - (2)

- Couche Réseau dans Internet
 - Le protocole IPv4
 - Adressage IP et *Subnets*
 - Protocoles de Contrôle
 - Protocoles de Routage
 - Extensions (Multicast, Mobile, CIDR, IPv6)
 - Exercices
- Couche Réseau dans ATM
- Contrôle de Congestion

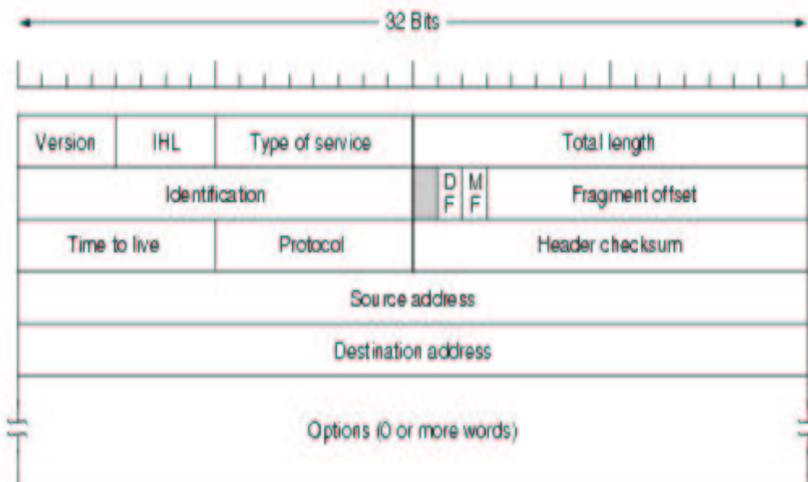
Structure de l'Internet

- Ensemble de réseaux (AS, *Autonomous systems*) interconnectés par un protocole de niveau réseau : IP (IPv4 dans le RFC 791)



Entête IPv4

- Transmission en format *big-endian*



Options IPv4

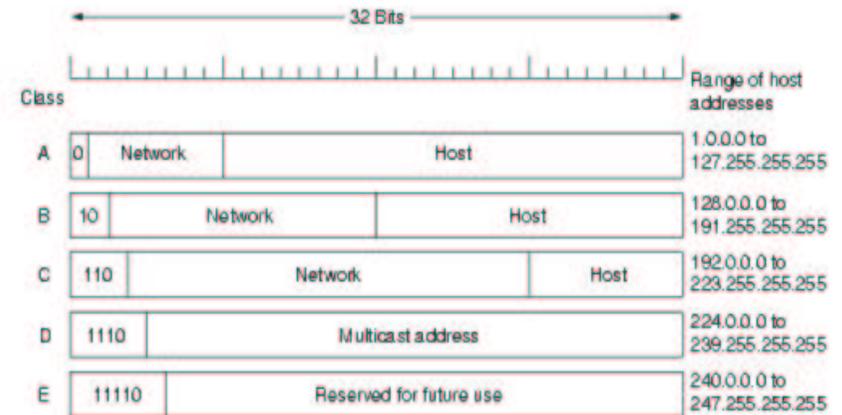
- Sécurité
- *Strict source routing*
- *Loose source routing*
- Enregistrement de route
- Estampilles temporelles
- ...

Plan - Couche Réseau - (2)

- Couche Réseau dans Internet
 - Le protocole IP
 - Adressage IP et Subnets
 - Protocoles de Contrôle
 - Protocoles de Routage
 - Extensions (Multicast, Mobile, CIDR, IPv6)
 - Exercices
- Couche Réseau dans ATM
- Contrôle de Congestion

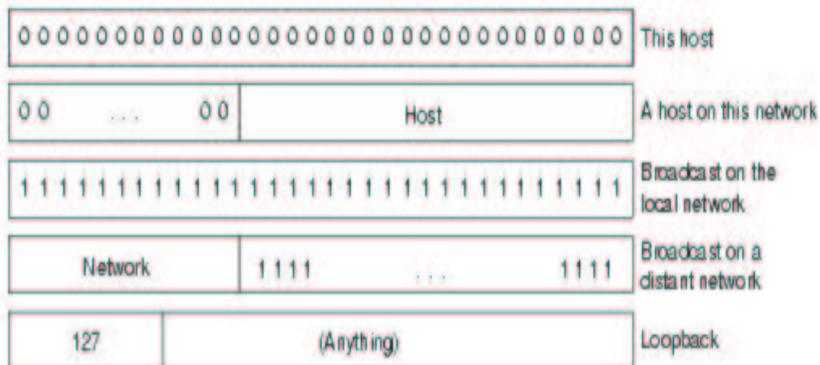
Formats d'adresses IPv4

- Assignment par les NICs (*Network Information Centers*)
- Notation **décimale pointée** (*dotted decimal notation*)



Adresses IPv4 Particulières

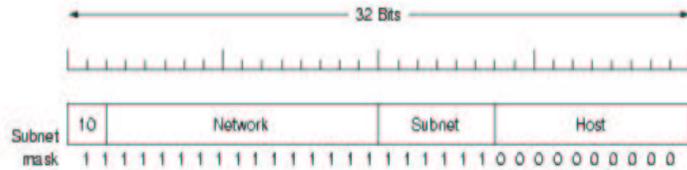
- *Loopback* (traitement local en tant que paquet reçu)



Traitement des Paquets IPv4

- Table de routage avec :
 - adresse de réseau + **netmask** + interface de sortie + adresse routeur intermédiaire si besoin
- Traitement pour:
 - (1) recherche *longest prefix match*
 - (2) Si même réseau alors envoi direct
 - 192.227.71.199 Adresse interface destinataire
 - 255.255.255.0 Netmask interface destinataire
 - 192.227.71.18 Adresse interface locale
 - (3) Sinon envoi à l'hôte intermédiaire

Sous-Réseaux



- 132.227.171.199 Adresse interface
- 255.255.252. 0 Subnet mask
- 132.227.168. 0 Sub. & ADR.if = Adresse Subnet
- 0 . 0 . 3 .199 !Sub. & ADR.if = Adresse Host

Plan - Couche Réseau - (2)

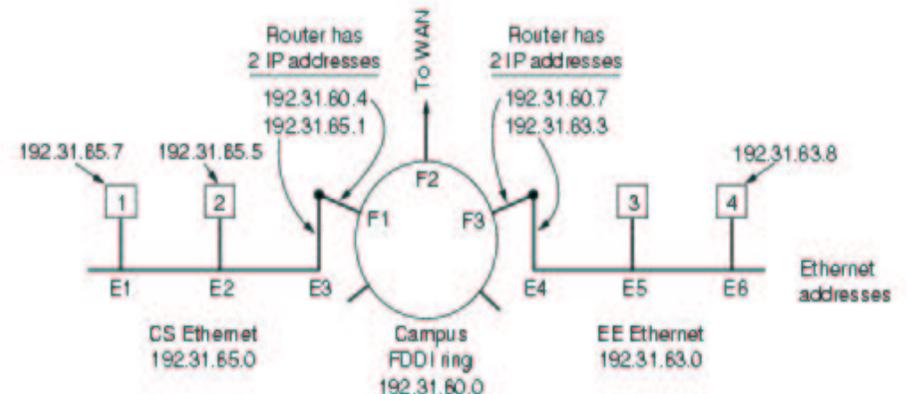
- Couche Réseau dans Internet
 - Le protocole IP
 - Adressage IP et Subnets
 - **Protocoles de Contrôle**
 - Protocoles de Routage
 - Extensions (Multicast, Mobile, CIDR, IPv6)
 - Exercices
- Couche Réseau dans ATM
- Contrôle de Congestion

ICMPv4

- Internet Control Message Protocol (RFC 792)
- Test et retour d'erreur du réseau
- Types de messages :
 - 0 Echo Reply
 - 3 Destination Unreachable
 - 4 Source Quench
 - 5 Redirect
 - 8 Echo
 - 11 Time Exceeded
 - 12 Parameter Problem
 - 13 Timestamp
 - 14 Timestamp Reply
 - 15 Information Request
 - 16 Information Reply

ARP

- Address Resolution Protocol (RFC 826)
 - « Quelle est l'adresse MAC du destinataire possédant l'adresse IP 192.55.123.78 ? »



RARP, BOOTP...

- Configuration automatique de l'adresse IP
- RARP *Reverse Address Resolution Protocol* (RFC 903)
 - « Mon adresse MAC est 45.00.FE.67.89.AB, qui connaît mon adresse IP »
 - *broadcast limité* (FF.FF.FF.FF.FF.FF)
- BOOTP *Bootstrap Protocol* (RFC 951, 1048 et 1084)
- DHCP *Dynamic Host Configuration Protocol*...

Plan - Couche Réseau - (2)

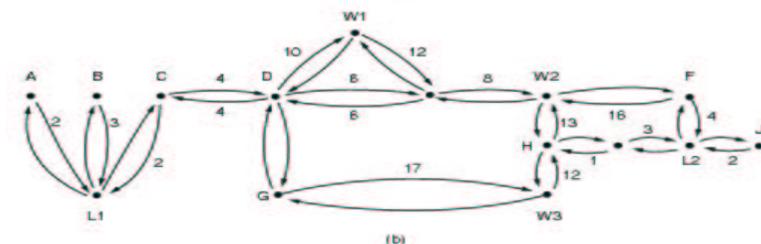
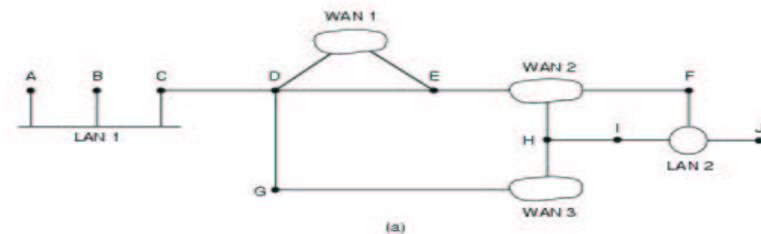
- Couche Réseau dans Internet
 - Le protocole IP
 - Adressage IP et *Subnets*
 - Protocoles de Contrôle
 - **Protocoles de Routage**
 - Extensions (Multicast, Mobile, CIDR, IPv6)
 - Exercices
- Couche Réseau dans ATM
- Contrôle de Congestion

IGRP

- *Interior Gateway Routing Protocol*
 - RIP *Routing Internet Protocol*
 - OSPF *Open Shortest Path First* (RFC 1247)
 - Ouvert
 - Routage basé sur l'état des liaisons (*Link State*)
 - Métriques
 - Plusieurs types de services
 - Répartition de charge (*Load Balancing*)
 - Représentation hiérarchique du réseau
 - Sécurisation des échanges

OSPF (1)

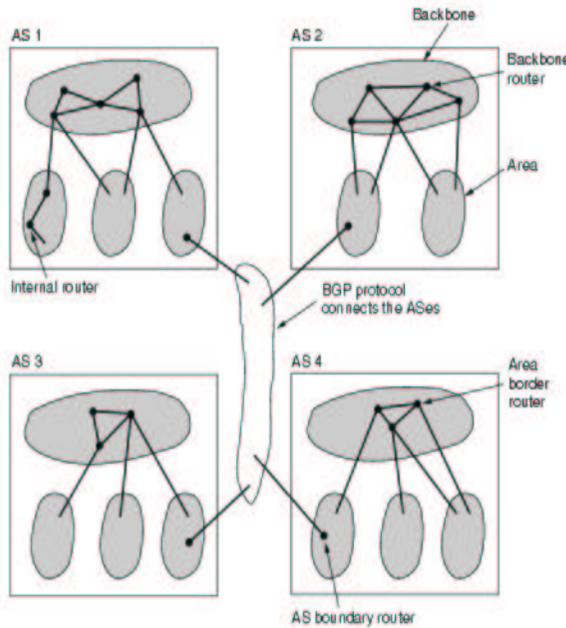
- Modélisation d'un AS (*Autonomous System*)



OSPF (2)

- Hiérarchisation :

- AS
 - Backbone (area 0)
 - backbone routers
 - area border routers
 - Area (area n)
 - internal routers
 - area border routers
 - AS boundaries routers
- Interconnexion avec EGRP...



EGRP

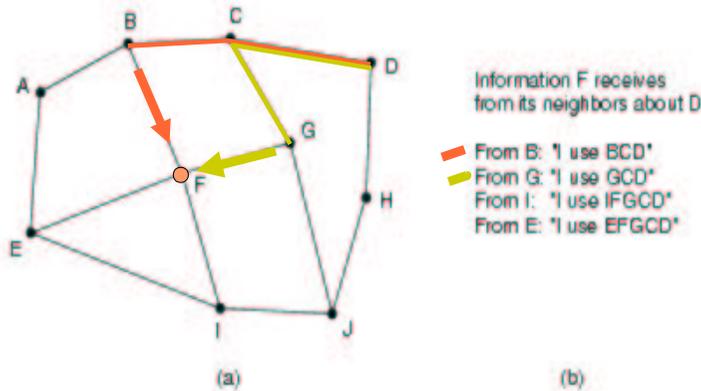
- Exterior Gateway Routing Protocol

- BGP Border Gateway Protocol

- Trois types de réseaux interconnectés :
 - Stub Networks (une connexion)
 - Multiconnected Networks (plusieurs connexions)
 - Transit Networks (backbone)
- Routage basé sur les vecteurs de distance mais orienté-chemin
- Politiques de routage variée
 - permet d'explicitement choisir un chemin en fonction des accord entre les différents fournisseurs

BGP

- Information envoyée à F :



Plan - Couche Réseau - (2)

- Couche Réseau dans Internet

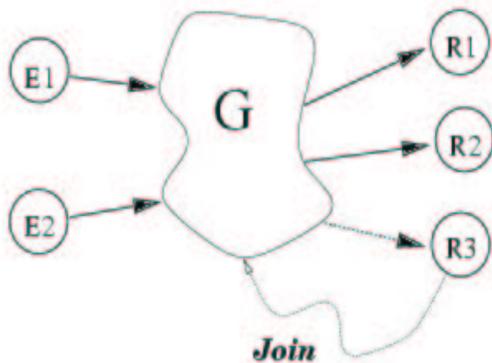
- Le protocole IP
- Adressage IP et Subnets
- Protocoles de Contrôle
- Protocoles de Routage
- Extensions (Multicast, Mobile, CIDR, IPv6)
- Exercices

- Couche Réseau dans ATM

- Contrôle de Congestion

IP Multicast : Adresses

- Adresses IP de classe D
 - 224.0.0.0 -> 239.255.255.255

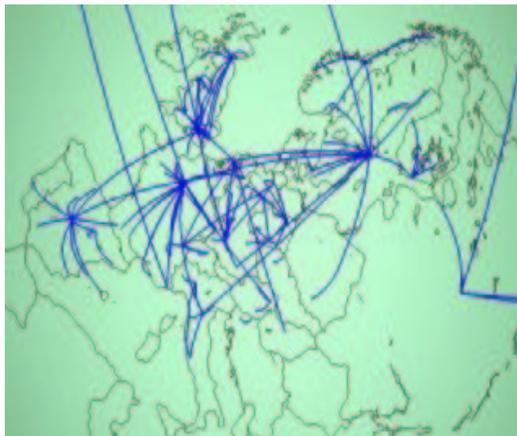


IP Multicast : IGMP

- *Internet Group Management Protocol* (RFC 1112)
 - Protocole de Contrôle (= ICMP)
 - Abonnement aux groupes par les hôtes
 - membres du groupe = récepteur
 - adhésion dynamique et libre
 - *Query* et *Response*
 - vers le *all-hosts* (224.0.0.1)
 - TTL = 1

IP Multicast : Mbone (1992)

- Surcouche de l'Internet (*overlay*)
- *mrouter* + *tunnel*
- DVMRP



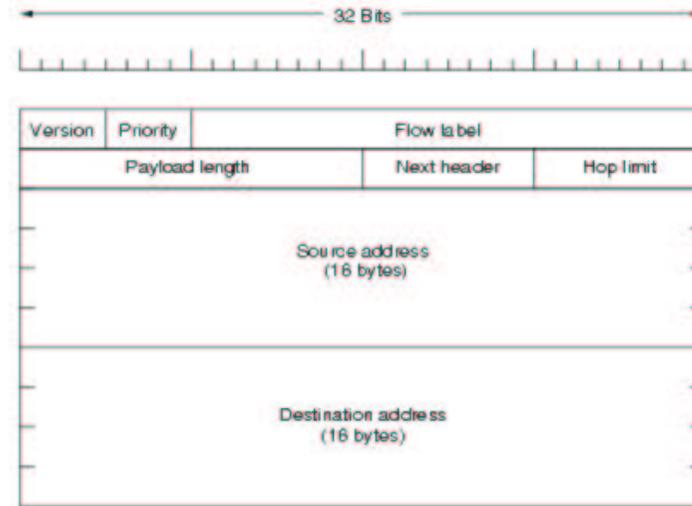
CIDR

- *Classless Inter-Domain Routing* (RFC 1518 - 1519)
 - agrégation d'adresses de classe C pour éviter la pénurie de classe B
 - extension du concept de *sub-netting* (*super-netting*)
 - association du *netmask* aux adresses pour le routage
 - exemple pour 1000 machines :
 - 192.227.171.199/22 adresse interface + netmask
 - 255.255.252. 0 « supernet » mask
 - 192.227.168. 0 sup. & adr.if = adresse « supernet »
 - 0 . 0 . 3 .199 ! sup. & adr.if = adresse Host

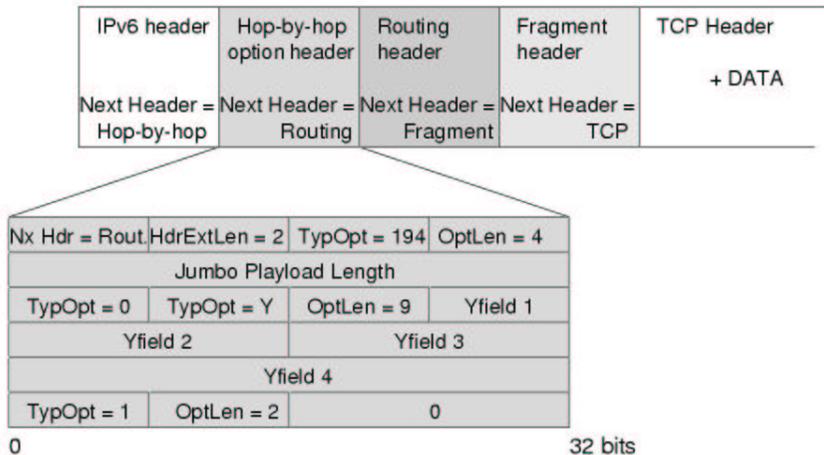
IPv6 : Buts (RFC 1550)

- 340.282.366.920.938.463.463.374.607.431.768.211.456 adresses (128 bits)
 - multiples adressages des interfaces
- Réduction des tables de routage
- Simplification du protocole
- Meilleure sécurité
- Intégration du *Multicast*
- Évolution et cohabitation avec IPv4

IPv6 : Entête



IPv6 : Chaînage



IPv6 : Adresses

Reserved	0000 0000	1/256
Unassigned	0000 0001	1/256
Reserved for NSAP Allocation	0000 001	1/128
Reserved for IPX Allocation	0000 010	1/128
Unassigned	0000 011	1/128
Unassigned	0000 1	1/32
Unassigned	0001	1/16
Unassigned	001	1/8
Provider-Based Unicast Address	010	1/8
Unassigned	011	1/8
Reserved for Neutral-Interconnect-Based Unicast Addresses	100	1/8
Unassigned	101	1/8
Unassigned	110	1/8
Unassigned	1110	1/16
Unassigned	1111 0	1/32
Unassigned	1111 10	1/64
Unassigned	1111 110	1/128
Unassigned	1111 1110 0	1/512
Link Local Use Addresses	1111 1110 10	1/1024
Site Local Use Addresses	1111 1110 11	1/1024
Multicast Addresses	1111 1111	1/256

Syntaxe des Adresses (RFC 2373)

- 3 types de représentation des adresses:
 - **Standard** x:x:x:x:x:x:x, avec 'x' la valeur hexadécimale de 16-bit de l'adresse (suppression des 0 mais toujours 1 chiffre entre « : »)
 - FEDC:BA98:7654:3210:FEDC:BA98:7654:3210
 - 1080:0:0:0:8:800:200C:417A
 - **Compressée** pour supprimer les longues chaînes de « 0 »
 - 1080::8:800:200C:417A (= 1080:0:0:0:8:800:200C:417A)
 - FF01::101 (= FF01:0:0:0:0:0:0:101 multicast)
 - ::1 (= 0:0:0:0:0:0:0:1 loopback)
 - :: (= 0:0:0:0:0:0:0:0 unspecified)
 - **Mixte IPv6 et IPv4** x:x:x:x:x:d.d.d.d avec 'd' la valeur décimale de 8 bits
 - 0:0:0:0:0:0:13.1.68.3 (= ::13.1.68.3)
- Notation avec préfixe :
 - « / » avec la valeur décimale de la longueur du préfixe (ex: 12AB00000000CD3) :
 - 12AB:0000:0000:CD30:0000:0000:0000:0000/60
 - 12AB::CD30:0:0:0:0/60
 - 12AB:0:0:CD30::/60
 - 12AB:0:0:CD30:123:4567:89AB:CDEF/60

Plan - Couche Réseau - (2)

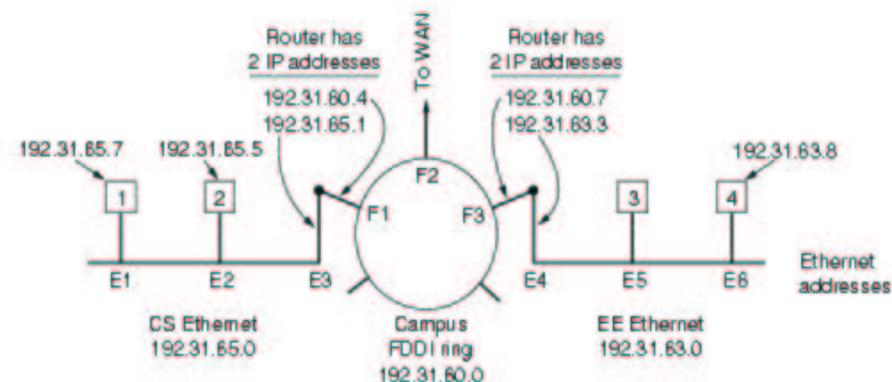
- Couche Réseau dans Internet
 - Le protocole IP
 - Adressage IP et Subnets
 - Protocoles de Contrôle
 - Protocoles de Routage
 - Extensions (Multicast, Mobile, CIDR, IPv6)
 - Exercices
- Couche Réseau dans ATM
- Contrôle de Congestion

IPv6 : Transition

- Lente...
 - Double pile protocolaire
 - Encapsulation dans IPv4 (6Bone)
 - Traduction des entêtes
 - dérivation des adresses ::132.227.61.12

Exercice 1

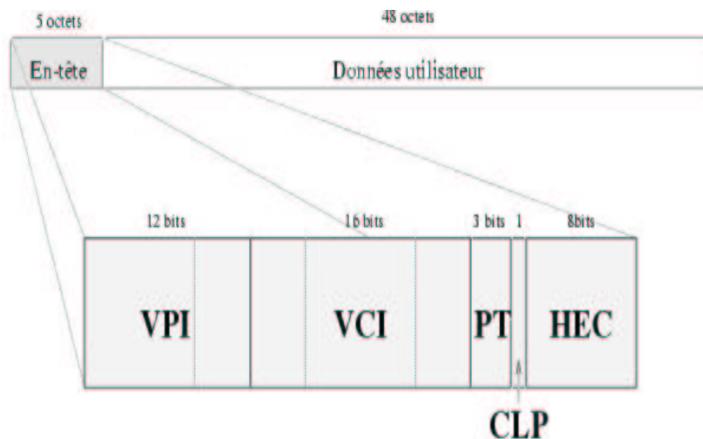
- Construction du paquet IP allant de 1 vers 4 et des trames intermédiaires
 - MAC[E1] = 00:12:34:11:54:32
 - MAC[E3] = 00:19:88:19:56:78
 - MAC[F1] = 03:67:77:55:55:31
 - MAC[F3] = 03:67:77:55:55:32
 - MAC[E4] = 00:10:54:11:54:32
 - MAC[E6] = 00:12:34:12:34:56



Exercice 2

- Structure d'un Paquet IPv4 avec un payload de 50 octets, 2 mots d'option, pas de fragmentation et un TTL de 16 ?

Format des Cellules



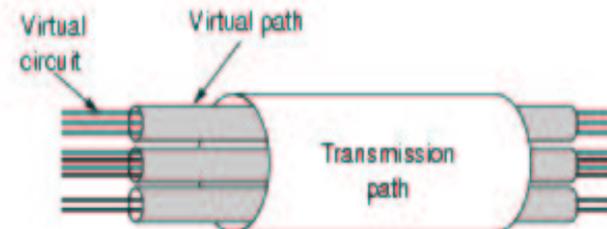
VPI Virtual Path Identifier
 VCI Virtual Channel Identifier
 PT Payload Type
 CLP Cell Loss Priority
 HEC Header Error Control

Plan - Couche Réseau (2) -

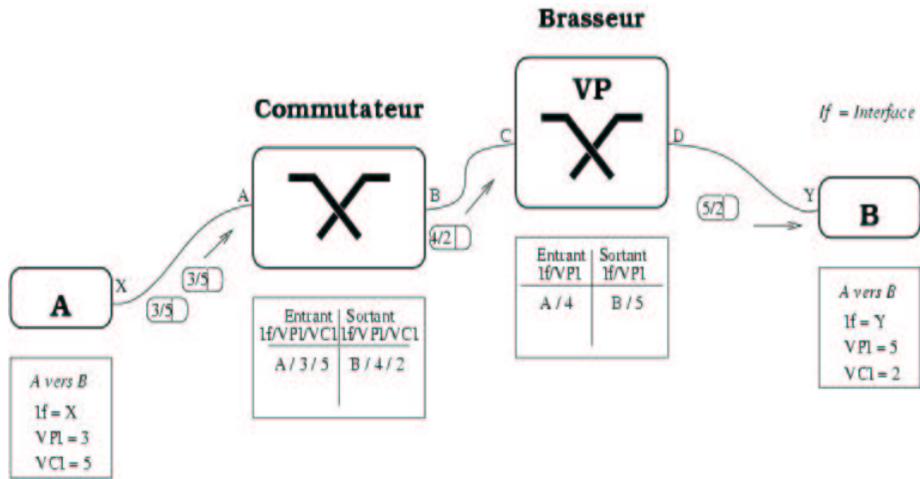
- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
 - Cellules et Commutation
 - Routage et Connexion initiale
 - Classes et Qualités de Service
 - Contrôle de Trafic
 - ATM LANs
 - Exercices
- Contrôle de Congestion

Chemins et Circuits Virtuels

- Transposition du concept de circuit dans le contexte commutation de cellules (=paquets)
- Mode orienté connexion
- Hiérarchie : 2 niveaux
 - Voies virtuelles (VC *Virtual Circuit*)
 - Conduits virtuels (VP *Virtual Path*)



Commutation



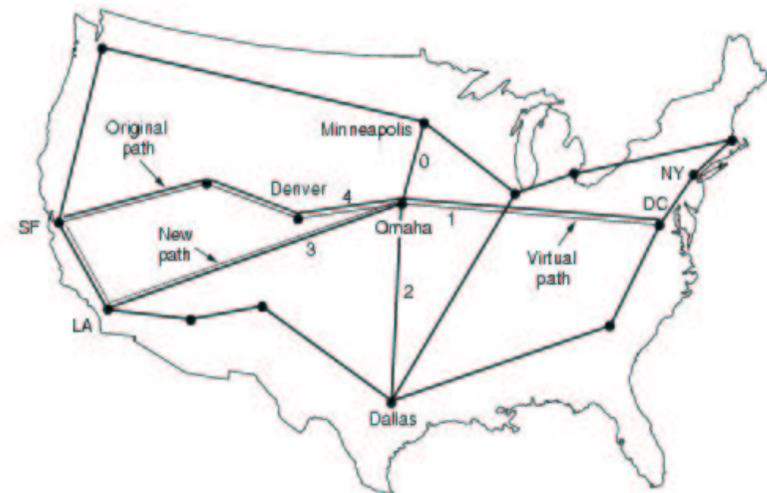
Plan - Couche Réseau (2) -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
 - Cellules et Commutation
 - **Routage et Connexion initiale**
 - Classes et Qualités de Service
 - Contrôle de Trafic
 - ATM LANs
 - Exercices
- Contrôle de Congestion

Connexion Initiale



Routage, Reroutage...



PNNI

- ...

Classes de Service (UNI 4.0)

- **CBR** *Constant Bit Rate*
- **RT-VBR** *Real Time Variable Bit Rate*
- **nRT-VBR** *Non-Real Time Variable Bit Rate*
- **ABR** *Available Bit Rate*
- **UBR** *Unspecified Bit Rate*

Plan - *Couche Réseau (2)* -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
 - Cellules et Commutation
 - Routage et Connexion initiale
 - **Classes et Qualités de Service**
 - Contrôle de Trafic
 - ATM LANs
 - Exercices
- Contrôle de Congestion

Paramètres de Qualité de Service

- **PCR** (*Peak Cell Rate*) indique le débit d'émission maximum des cellules
- **SCR** (*Sustainable Cell Rate*) - - le débit d'émission moyen des cellules
- **MCR** (*Minimum Cell Rate*) - - le débit d'émission de cellules minimum
- **MBS** (*Maximum Burst Size*) - - la taille maximum des agrégats de cellules
- **CDVT** (*Cell Delay Variation Tolerance*) - - la gigue maximum d'une cellule
- **CLR** (*Cell Loss Ratio*) - - le taux de cellules perdues ou arrivées trop tard
- **CTD** (*Cell Transfer Delay*) - - le délai de transmission d'une cellule
- **CDV** (*Cell Delay Variation*) - - la variation de délai de transmission d'une cellule
- **CER** (*Cell Error Rate*) - - le taux de cellules transmises sans erreurs
- **CMR** (*Cell Misinsertion Rate*) - - le taux de cellules délivrées à une mauvaise destination

Catégories de Services ATM

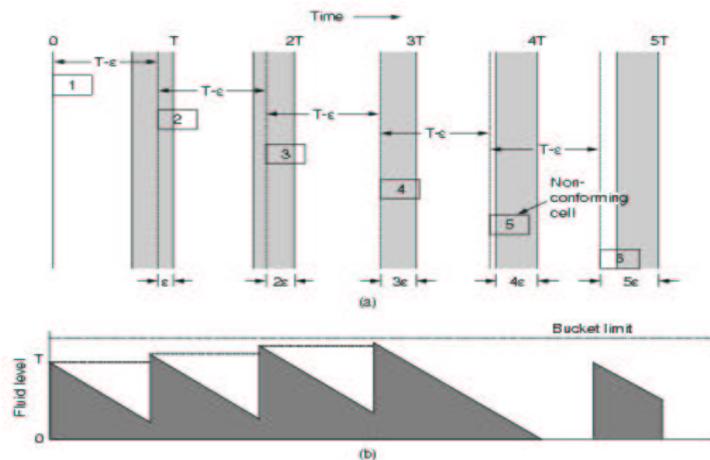
Paramètres QoS	CBR	rt-VBR	nrt-VBR	ABR	UBR
• CLR pour CLP=0	oui	oui	oui	oui	non
• CLR pour CLP=1	opt.	opt.	opt.	oui	non
• CTD	oui	oui	oui	non	non
• CDV	oui	oui	non	non	non
• SCR et MBS	-	oui	oui	-	-
• PCR et CDVT	oui	oui	oui	oui	oui
• MCR	-	-	-	oui	-
• Ctrl. de flux	-	-	-	oui	-

Plan - Couche Réseau (2) -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
 - Cellules et Commutation
 - Routage et Connexion initiale
 - Classes et Qualités de Service
 - **Contrôle de Trafic (*Shaping, Policing, Congestion*)**
 - ATM LANs
 - Exercices
- Contrôle de Congestion

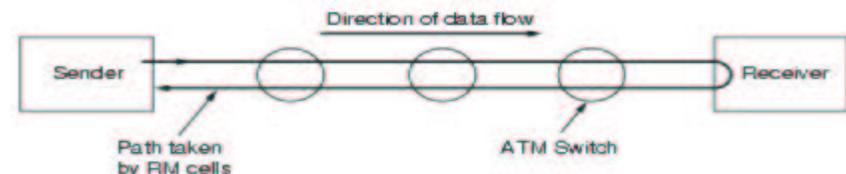
Traffic Shapping et Policing

- GCRA (*Generic Cell Rate Algorithm*)
 - vérifie la conformité de chaque cellules
 - correspond à un *leaky bucket*
 - avec PCR et CDTV



Contrôle de Congestion

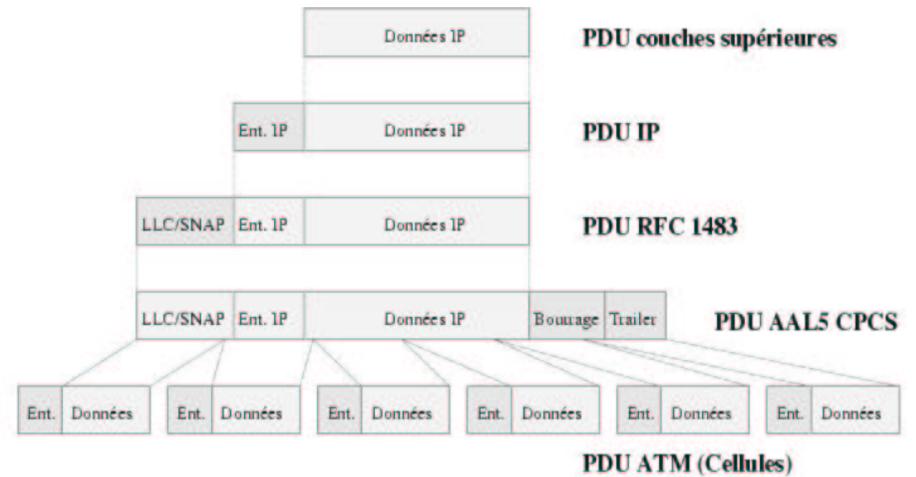
- Problèmes :
 - à court terme : *burst*
 - à long terme : **dépassement de capacité**
- Stratégies :
 - **contrôle d'admission** (CBR, VBR, UBR)
 - **réservation de ressources** (VBR) (multiplex. stat.)
 - **contrôle de congestion selon le débit** (ABR) (*rate-based*)



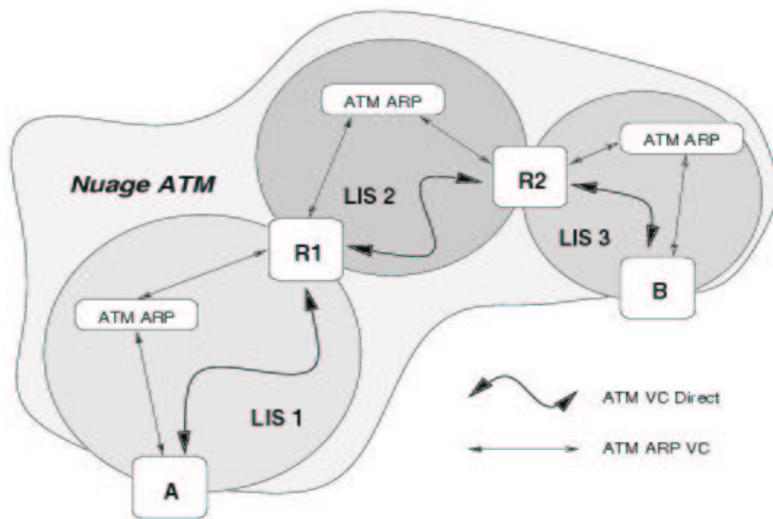
Plan - Couche Réseau (2) -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
 - Cellules et Commutation
 - Routage et Connexion initiale
 - Classes et Qualités de Service
 - Contrôle de Trafic
 - ATM LANs
 - Exercices
- Contrôle de Congestion

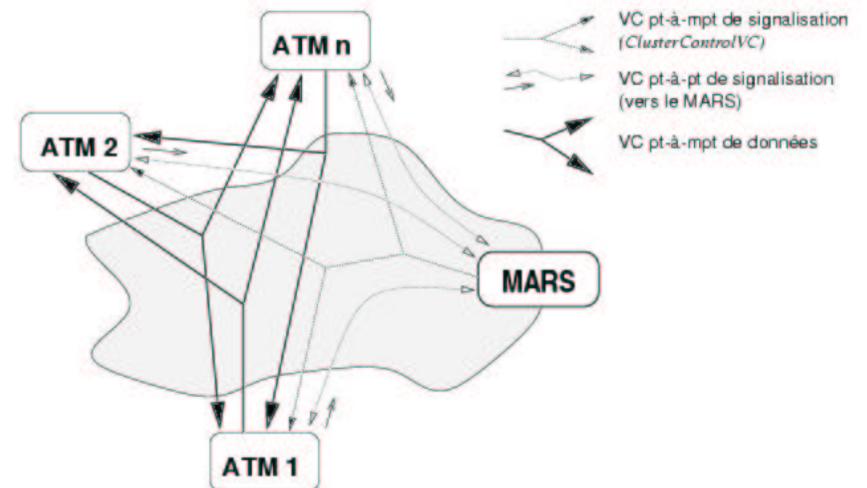
CLIP (1)



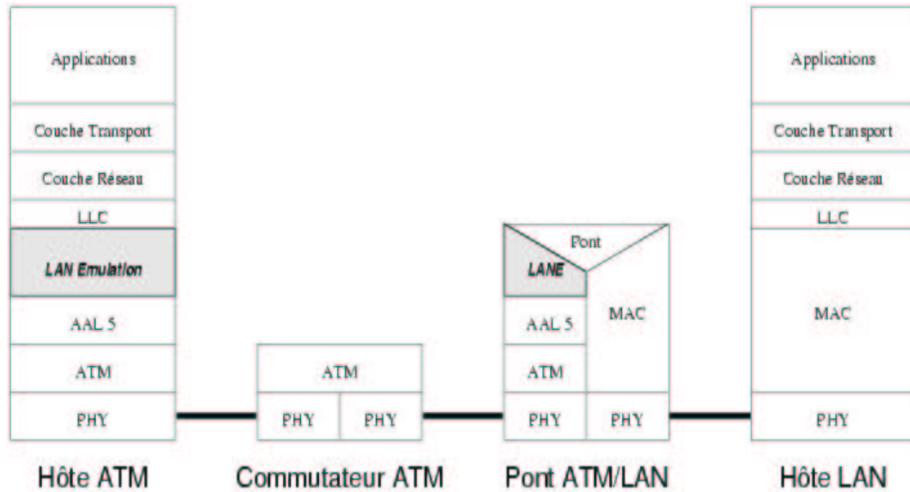
CLIP (2)



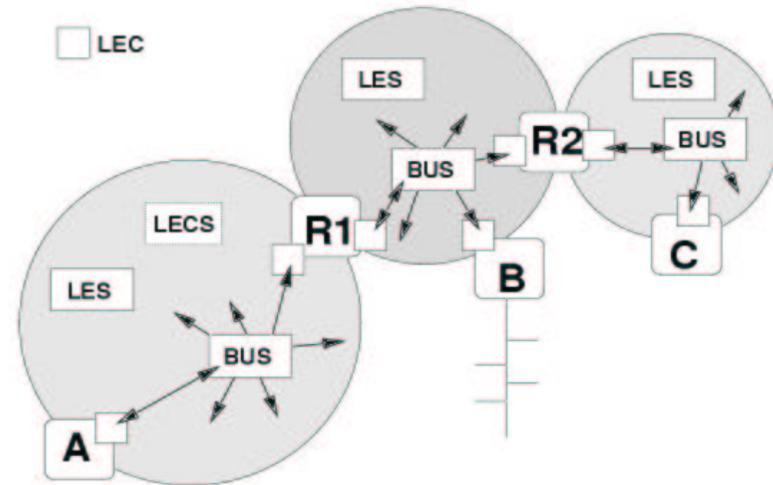
MARS



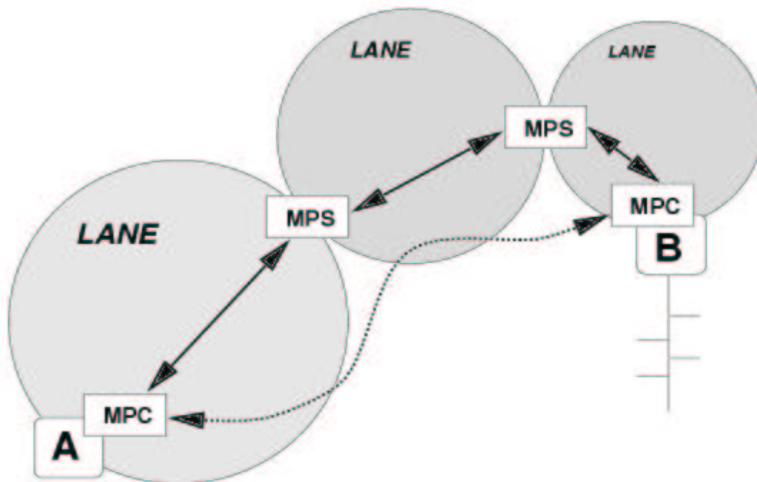
LANE (1)



LANE (2)



MPOA



Plan - Couche Réseau (2) -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
 - Cellules et Commutation
 - Routage et Connexion initiale
 - Classes et Qualités de Service
 - Contrôle de Trafic
 - ATM LANs
 - Exercices
- Contrôle de Congestion

Exercice 3

- Un nouveau circuit virtuel est mis en place dans un réseau ATM, **combien** de messages sont échangés pour établir ce circuit qui passe par trois commutateurs intermédiaires.
- En supposant que les VP utilisés sont les suivants : 0, 5, 18, 7, 0 ; donnez des valeurs possibles des **entêtes** des cellules ATM qui traverseront ce circuit.

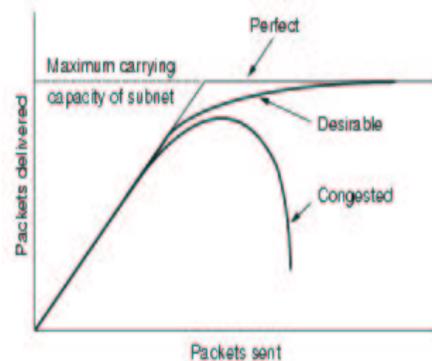
- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
- **Contrôle de Congestion**
 - Définition et principes
 - Conditionnement
 - Spécification de flux
 - RSVP
 - Exercices

Définition

- Quand il y a trop de paquets en un point du réseau : baisse de performance -> **Congestion**

- Causes:

- trop de paquets
 - processeur trop lent
 - plus de mémoire
- auto-générateur



Principe du Contrôle de Congestion

- Contrôle en boucle ouverte (*open loop*)
 - basé sur la prévention (pas d'intervention lors du fonctionnement du système)
 - contrôle d'accès, politique de perte...
- Contrôle en boucle fermée (*closed loop*)
 - basé sur le traitement réactif (mécanismes de *feedback*)
 - surveillance pour découvrir la congestion
 - information vers les nœuds actifs
 - correction du problème

Mécanismes associés à la congestion

- Couche Liaison
 - Politique de retransmission
 - Gestion du ré-ordonnement
 - Gestion des acquittements
 - Politique de contrôle de flux
- Couche Réseau
 - Algorithme de routage
 - Gestion de la durée de vie des paquets
 - Ordonnement des files d'attentes
 - Politique de service
 - Politique de perte
 - Technique (Datagrammes ou Circuits Virtuels)
- Couche Transport
 - Politique de retransmission
 - Gestion du ré-ordonnement
 - Gestion des acquittements
 - Politique de contrôle de flux
 - Détermination des temporisations

Contrôle de congestion vs Contrôle de flux

- Ne pas confondre :
 - Contrôle de congestion = problème du réseau
 - 1000 ordinateurs vers 1000 autres dont les paquets passent par le même point dans le réseau
 - Contrôle de flux = problème de bout-en-bout (non lié au réseau mais aux hôtes d'extrémité)
 - 1 super-ordinateur vers un PDA

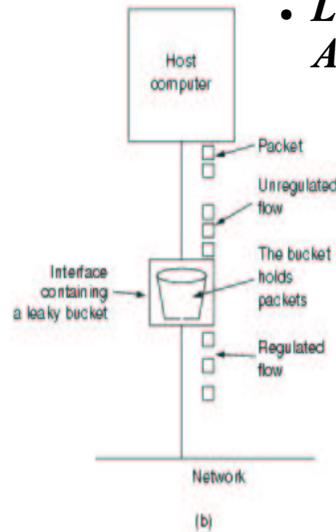
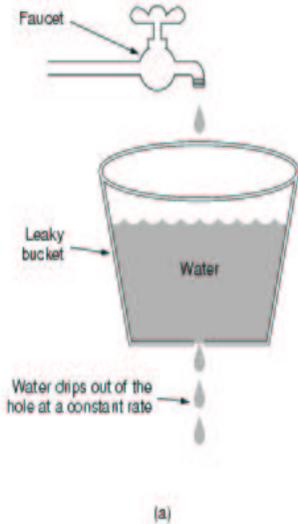
Plan - Couche Réseau (2) -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
- **Contrôle de Congestion**
 - Définition et principes
 - **Conditionnement**
 - Spécification de flux
 - RSVP
 - Exercices

Conditionnement du Trafic

- Objectif :
 - le trafic est très irrégulier , souvent *bursty*
 - besoin de **lissage** (*traffic shaping*)
 - débit crête (*peak rate*), débit moyen (*average rate*)
 - moins de congestion avec un trafic uniforme et prévisible
 - permet de gérer un **contrat de trafic**
 - proposition au réseau lors su **contrôle d'admission**
 - surveillance grâce au *traffic policing*

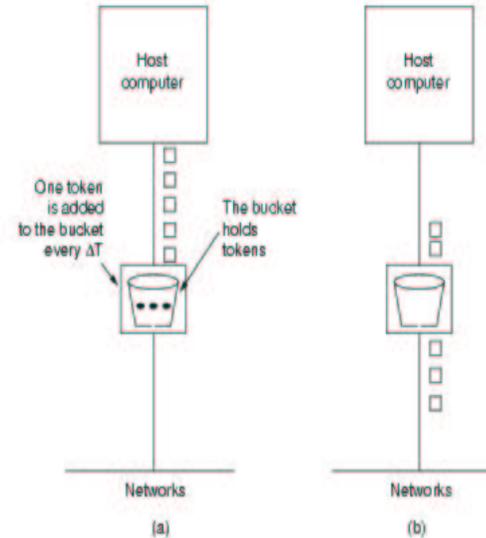
Algorithme du Seau Percé



• Leaky Bucket Algorithm

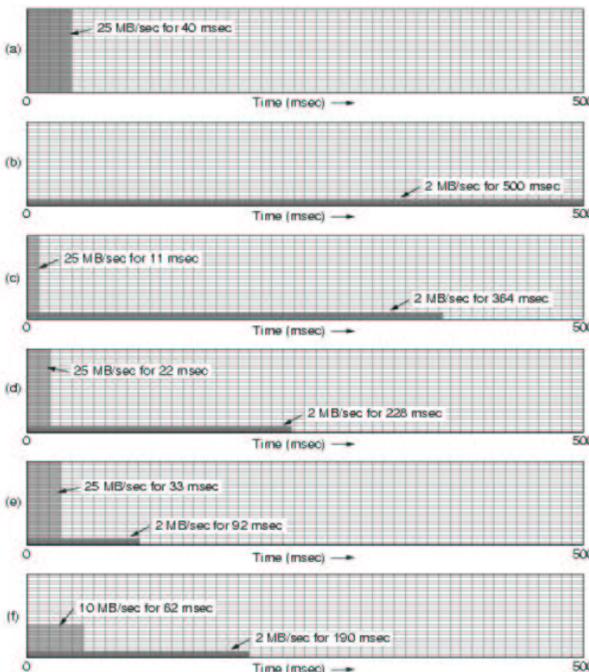
- débit de sortie **constant** (tant que le seau n'est pas vide)
- contenance maxi (si dépassement alors perte)
- Sur un routeur, profondeur du seau = logueur de la file d'attente

Algorithme du Seau de Jeton



• Token Bucket Algorithm

- pour mieux absorber les **burst** : permet d'économiser...
- remplissage régulier du seau avec des **jetons**
- passage d'autant de paquets que de jetons disponibles
- un paquet qui passe supprime un jeton
- nombre maximum de jeton (taille du **burst** généré maximum)



Comparaison

- (a) entrée du *leaky bucket* : **burst 1MB** à 25MB/sec
- (b) sortie du *leaky bucket* à 2MB/sec et capacité > 1MB
 - limitation du débit crête
- (c) sortie d'un *token bucket* de 250 KB (jeton généré à 2MB/sec)
 - limitation du débit moyen
- (d) idem avec *token bucket* de 500 KB
- (e) idem avec *token bucket* de 750 KB
- (f) Combinaison des deux

Plan - Couche Réseau (2) -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
- **Contrôle de Congestion**
 - Définition et principes
 - Conditionnement
 - **Spécification de flux**
 - RSVP
 - Exercices

Spécification de Flux

- Le bon fonctionnement du **conditionnement** repose sur une spécification globale des flux (*flow specification*) :
 - Paramètres spécifiés
 - Caractéristiques de la Source
 - taille maximum des paquets [octets]
 - débit crête (maximum) [octets/s]
 - débit moyen (debit des jetons) [octets/s]
 - taille des rafales (taille du seau) [octets]
 - Caractéristiques de Service Demandé (par l'application)
 - Type de perte (fréquence, agrégation,...)
 - délais mini, maxi, gigue (*jitter*)...
 - Qualité de garantie

IntServ

- ...

Plan - *Couche Réseau (2)* -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
- **Contrôle de Congestion**
 - Définition et principes
 - Conditionnement
 - Spécification de flux
 - **RSVP**
 - Exercices

Contrôle de Congestion pour les Communications Multipoints

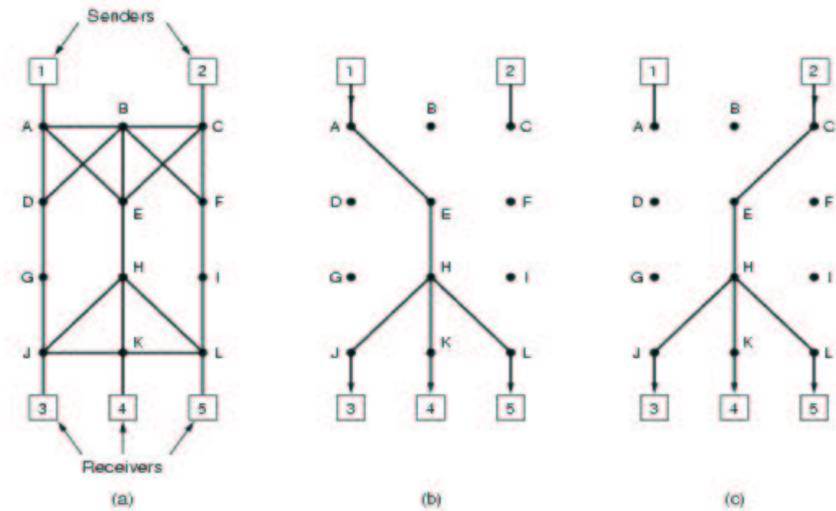
- Mécanismes précédents orientés **point-à-point**
- Besoin de mécanisme lors de destinataires multiples :
 - avec gestion de groupe dynamique
 - taille de groupe importante

RSVP (1)

- **Ressource ReSerVation Protocol** (1993)
- Évite la congestion grâce à un modèle de réservation multipoint-à-multipoint :
 - Construction d'un arbre inverse
 - Réservation par les récepteurs avec agrégation
 - Hétérogène et dynamique

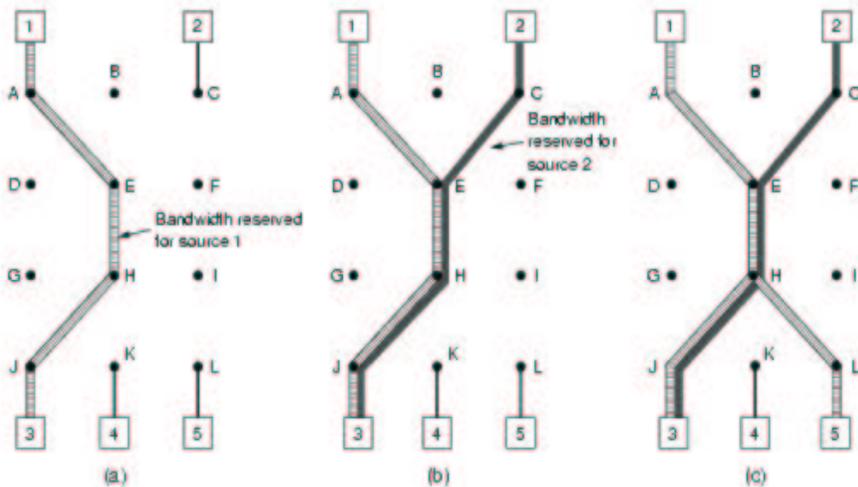
RSVP (2)

- Arbre couvrant de [1] et de [2]



RSVP (3)

- Demande de ressources de [3] vers 1 et 2 puis [5] vers 1



Plan - Couche Réseau (2) -

- Couche Réseau dans Internet
- Couche Réseau dans ATM
- **Contrôle de Congestion**
 - Définition et principes
 - Conditionnement
 - Spécification de flux
 - RSVP
 - Exercices

Exercice 4

- Un ordinateur est connecté à un réseau à 10-Mbps et est régulé par un *token bucket*. Ce dernier est rempli de jeton à 5-Mbps et est rempli à pleine capacité avec 20-Mb.
 - Combien de temps peut-on débiter au maximum ?

Exercice 5

- Pour la **spécification de flux**, 4 paramètres ont été proposés pour caractériser la source.
 - Si :
 - la taille max du paquet = 1-Ko
 - le débit maximum est de 100-Mops
 - le débit du *token bucket* est de 20-Mops
 - la taille du *token bucket* est de 1-Mo
 - Combien de temps dure au maximum une rafale ?