

Couche réseau & Protocole IP

Introduction

La couche "liaison" s'occupe des communications point à point.

La couche "réseau" s'occupe de :

- ▶ router les informations dans le réseau
- ▶ trouver et mettre à jour les routes
- ▶ détecter nouveaux liens
- ▶ détecter les pertes de liens et problèmes de congestion

Sur internet : protocoles IP

- ▶ IPv4 : le plus courant, mais on arrive à bout des adresses disponibles
- ▶ IPv6 : le nouveau, partiellement en place

Commutation de paquets vs de circuits

Il existe deux grand types de réseaux :

- ▶ Réseaux à commutation de paquets (store-and-forward)
 - ▶ Unité de base, un "paquet" : une suite d'octets
 - ▶ Le routeur reçoit un paquet, analyse à qui il est destiné, et le renvoie dans la bonne direction
- ▶ Réseaux à commutation de circuit
 - ▶ Chaque routeur prépare la route en connectant le port d'entrée au port de sortie. Puis l'information passe en flux jusqu'à la fin de la communication
 - ▶ Exemple : réseau téléphonique traditionnel

Il est aussi possible d'avoir des réseaux à paquets, où les routes sont prédéfinies à l'avance pour chaque connexion.

Internet : commutation de paquets.

Unité de base du protocole : "paquet IP"

Routage de paquets

Chaque noeud interne du réseau (noeud avec au moins 2 voisins) doit choisir, quand il reçoit un paquet, à qui il doit le transférer. ("Router un paquet").

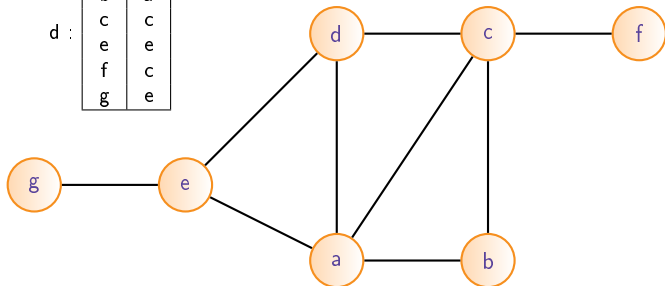
Un noeud interne est souvent appelé un routeur (ordinateur ou matériel spécialisé)

Il possède pour cela une table de routage :

- ▶ une table de paires (adresse, voisin)

d :

a	a
b	a
c	c
e	e
f	c
g	e



Routage hiérarchique

Problème : la table a autant d'entrées que de noeuds dans le graphe.

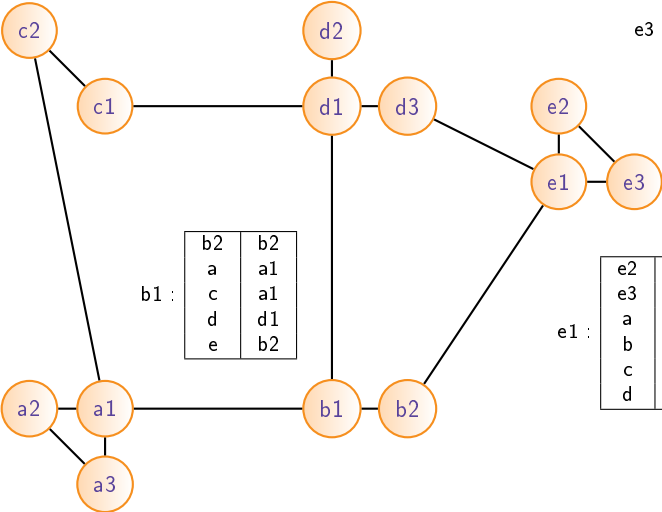
Internet IPv4 : $\sim 2^{32} = \sim 4$ milliard...

Solution : Routage hiérarchique

Chaque le réseau est divisé en sous réseaux :

- ▶ les adresses sont hiérarchiques, du type "sous-reseau.machine"
- ▶ chaque sous réseau S sait comment router ses paquets
- ▶ en dehors du sous-réseau S , tous les paquets vers une machine de S est routé vers le même routeur, un point d'entrée de S .

Routage hiérarchique



b1 :

b2	b2
a	a1
c	a1
d	d1
e	b2

e3 :

e1	e1
e2	e2
a	e1
b	e1
c	e1
d	e1

e1 :

e2	e2
e3	e3
a	b2
b	b2
c	d3
d	d3

Trouver les tables

Les tables de routage peuvent être définies statiquement (routage statique), ou dynamiquement

- ▶ Statique : L'administrateur de la machine/routeur définit les entrées de la table.
Cas habituel pour vos machines.
Problème : ingérable pour les routeurs internes
- ▶ Dynamique : Le routeur construit lui même sa table de routage, en partageant des informations avec ses voisins

Comment un routeur peut faire pour remplir/compléter/mettre à jour sa table de routage ?

Routage par inondation

Découverte de routes par inondation :

Si on ne connaît pas la direction pour un noeud, on peut faire une diffusion générale ("broadcast") d'un paquet demandant où se trouve le noeud

Chaque routeur qui reçoit le paquet de demande : soit

- ▶ répond si il sait, ou
- ▶ renvoie le paquet à tous ses autres voisins

Problème : lourd

Pour éviter de trop encombrer le réseau :

- ▶ Chaque requête possède un numéro. On garde mémoire des requêtes déjà renvoyées, pour ne pas le faire une deuxième fois
- ▶ Pour chaque demande non satisfaite, on attend un petit moment avant de la renvoyer. Si on reçoit la même demande entre temps d'un autre voisin, on ne la lui retransmettra pas.

Plus court chemin

Si un routeur connaît la topologie du réseau, il peut effectuer un algorithme du plus court chemin (comme l'algorithme de Dijkstra)

⇒ plus court chemin dans un graphe

Avantage : poids sur les liens (distance, prix...)

Problème : il faut connaître toute la topologie du réseau

Vecteur de distance (Bellman-Ford)

- ▶ Chaque routeur connaît la distance vers ses voisins. (d_i)
- ▶ Distance : nombre de sauts, délai de propagation...
- ▶ Chaque routeur maintient (en plus de sa table de routage) une liste de distance estimée à tous les noeuds du réseau ("vecteur")
- ▶ Chaque routeur envoie régulièrement à tous ses voisins ce vecteur
- ▶ Le routeur met à jour sa table de routage : pour chaque noeud x dont il a connaissance, il route le paquet vers le voisin i qui minimise $d_i + V_i[x]$. (Et met à jour son vecteur de distance en même temps)

Problème : si une route disparaît, l'information mettra du temps à être corrigée... (problème de la valeur infinie)

État de lien

Routage par informations d'état de lien :

- ▶ Chaque routeur construit un paquet avec l'ensemble de ses voisins, et la distance
- ▶ Le paquet est broadcasté sur tout le réseau (avec un numéro de séquence)
- ▶ Chaque routeur connaît donc l'ensemble des noeuds et leurs voisins, et peut reconstruire le graphe
- ▶ Les routes sont décidées grâce à un algorithme comme Dijkstra

Contrôle de la congestion

En cas de congestion, il peut y avoir l'effondrement du débit du réseau :

- ▶ les émetteurs retransmettent les paquets perdus (ou trop retardés), qui seront à nouveau perdus...

Lors d'une congestion, que faire ?

- ▶ augmenter la capacité du lien
- ▶ rerouter sur une route moins encombrée
- ▶ avertir les sources
- ▶ contrôle d'admission
- ▶ éliminer des paquets...

Qualité de service (QoS)

Toutes les applications utilisant le réseau n'ont pas les mêmes besoins. Par exemple :

- ▶ Visio-conf : demande haute en délai, faible en fiabilité, haute en bande passante
- ▶ Mail : demande faible en délai, haute en fiabilité, faible en bande passante

Les algorithmes de routage peuvent considérer plusieurs classes de paquets

Par exemple : on préfère perdre des paquets plutôt que les faire attendre lors des congestions.

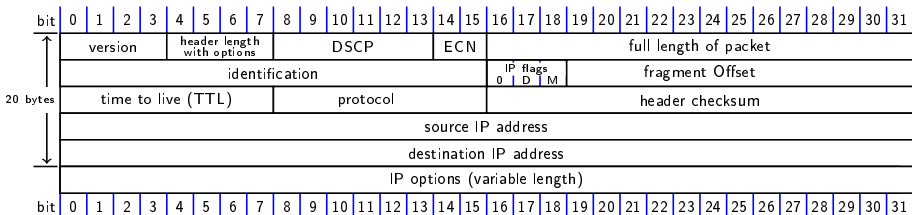
Internet Protocol

Protocole réseau utilisé sur Internet : IP (Internet Protocol). Deux versions :

- ▶ IPv4 : le plus utilisé actuellement, mais un nombre d'adresses limité ($< 2^{32}$).
- ▶ IPv6 : la nouvelle norme, partiellement en place

Routage de paquets, store-and-forward

Entête IPv4



- ▶ Version = 4
- ▶ DSCP (Differentiated Services Code Point) : Classe du paquet (QoS)
- ▶ ECN (Explicit Congestion Notification)
- ▶ Identification / D / M / Fragment Offset : Quand un paquet est fragmenté, tous les fragments qu'un paquet contiennent la même identification. Fragment Offset contient la position du fragment. (D : Don't fragment. M : More fragment)
- ▶ TTL : décrémenté à chaque saut (retransmission par un routeur). Quand il atteint 0, le paquet est éliminé (et un message ICMP est envoyé à la source)
- ▶ Protocol : TCP=6, UDP=17, ICMP=1...
- ▶ Options : Routage strict, enregistrement de la route...

Attention : Big endian !

Adresses IPv4

Une adresse IPv4 = 32 bits

- ▶ c-à-d 4 octets, ou
- ▶ 4 entiers de 0 à 255.

Notation a.b.c.d. Ex : 192.168.1.1

ICANN (Internet Corporation for Assigned Names and Numbers) fournit les adresses

Organisées hiérarchiquement en sous-réseaux

Sous réseaux IPv4

Un sous réseau possède une adresse IP i , et un masque m de sous-réseau

Toutes les adresses IP j telles que $j \& m = i$ font parties du sous-réseau.

Masque (ou netmask) : en binaire : suite de k '1', puis de $32 - k$ '0'

Notation : ip/k :

Exemple : 192.168.1.0/24 signifie que :

- ▶ le masque est 255.255.255.0
- ▶ le sous réseau va de 192.168.1.0 à 192.168.1.255

Sous réseaux IPv4 : Exemple

- ▶ Machine (hôte) d'adresse IP : 147.222.23.42
- ▶ Sur le réseau : 147.222.16.0/20
- ▶ ⇒ Masque réseau : 255.255.240.0

Adresse hôte	147							222							23				42														
Adresse hôte	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
Masque	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Adresse réseau	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Adresse réseau	147							222							16				0														
	Champ sous-réseau														Champ hôte																		

Routing simple

Pour voir/configurer les interfaces réseaux et les adresses IP/masque : `ifconfig`.

Routing statique via une passerelle (cas simple de routage)

- ▶ Tous les paquets pour les adresses IP dans le réseau sont envoyé directement au destinataire via Ethernet (ou Wifi, ou la couche liaison du réseau)
- ▶ Tous les autres paquets sont envoyés à la passerelle (l'adresse IP de l'interface du routeur qui est connecté au reste d'Internet)

Pour voir/configurer les routes sur Linux : `route`

Table de routage IP du noyau

Destination	Passerelle	Genmask	...	lface
0.0.0.0.	140.77.12.1	0.0.0.0		eth0
140.77.12.0	0.0.0.0	255.255.254.0		eth0
169.254.0.0	0.0.0.0	255.255.0.0		eth0

(Règle du "plus grand préfixe commun")

Adresses réservées

Certaines plages d'adresses sont réservées :

- ▶ 127.0.0.0/8 : Bouclage interne
- ▶ 255.255.255.255/32 : Broadcast local
- ▶ 10.0.0.0/8, 172.16.0.0/12, 196.168.0.0/16 : Adresses privées (NAT)
- ▶ 169.254.0.0/16 : lien local
- ▶ 224.0.0.0/4 : multicast
- ▶ 240.0.0.0/4 : réservé pour une utilisation future...
- ▶ ...

NAT (Network Address Translation)

Pour éviter de gaspiller les adresses et d'avoir à demander à l'ICANN des adresses pour les machines personnelles ou qui ne nécessitent pas une adresse IP visible de l'extérieur (pas de serveur)

- ▶ Assigner à un sous-réseau local une seule adresse IP (addr) pour internet

Principe de NAT :

- ▶ Les machines à l'intérieur du réseau local ont une adresse IP en 192.168.0.0/16, 10.0.0.0/8 ou 172.16.0.0/12.
- ▶ Quand elles veulent envoyer un paquet à Internet, elles passent par une passerelle, qui est connectée à Internet via l'adresse addr
- ▶ La passerelle remplace dans le paquet IP l'adresse du réseau local en addr avant d'envoyer le paquet sur Internet
- ▶ Quand la passerelle reçoit un paquet depuis internet, elle analyse les entêtes des paquets TCP et UDP, et regarde le port utilisé pour retrouver l'adresse du destinataire dans le réseau.

IPv6

Problème d'IPv4 :

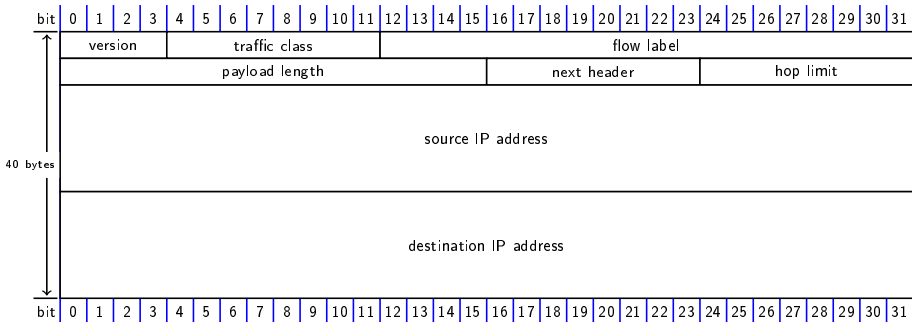
- ▶ Seulement 2^{32} adresses
- ▶ Tables de routage trop longues, dû à la fragmentation en sous-réseaux trop petits

Solution : IPv6

Changements entre IPv4 et IPv6 :

- ▶ Adresses sur 128 bits
- ▶ Simplification de l'en-tête
- ▶ Suppression de la somme de contrôle
- ▶ Suppression de la fragmentation des paquets en cours de route
- ▶ IPsec (Internet Protocol Security)
- ▶ ...

Entête IPv6



- ▶ version = 6
- ▶ traffic class = DSCP/ECN de IPv4
- ▶ flow label : identification du flux (réservation / QoS)
- ▶ hop limit : le nouveau nom du "time to live"
- ▶ next header : soit le contenu du prochain entête facultatif (option), soit le protocole
- ▶ options : informations sur la fragmentation, routage, chiffrement...

Adresse IPv6

8 blocs de 16 octets.

Les blocs sont écrits en hexadécimal, séparés par ":"

- ▶ On peut omettre les 0 de début de blocs
- ▶ Un ou plusieurs blocs consécutifs à 0 peuvent être remplacés par "::"

Exemple :

fe80:0000:0000:0000:028d:99ff:fec1:0078=

fe80::28d:99ff:fec1:78

Protocoles de gestion

La couche IP contient d'autres protocoles (de gestion) :

- ▶ ICMP : messages de contrôle IPv4
- ▶ ICMPv6 : messages de contrôle IPv6
- ▶ ARP/RARP : résolution d'adresse
- ▶ DHCP : configuration dynamique
- ▶ IGMP
- ▶ ...

ICMP

ICMP = Internet Control Message Protocol

Paquets ICMP :

- ▶ destination inaccessible
- ▶ délai expiré
- ▶ demande/envoi d'écho (ping)
- ▶ problème d'en-tête
- ▶ ...

Commandes utilisant les messages ICMP : ping, traceroute

ARP

ARP = Address Resolution Protocol

Permet, dans un sous-réseau, de trouver la correspondance entre l'adresse IP d'une interface et son adresse MAC. Principe :

- ▶ Quand un noeud ne connaît pas l'adresse MAC associée à une adresse IP, il envoie un paquet "broadcast" (à tout le monde) demandant :
- ▶ "Je suis (adresse IP)/(adresse MAC). À qui appartient (adresse IP)?"
- ▶ L'ordinateur possédant l'adresse IP répond.

- ▶ RARP (Reverse ARP) : demande l'adresse IP à partir de l'adresse MAC

Commande : `arp`

DHCP

DHCP = Dynamic Host Configuration Protocol

Un noeud sur un réseau peut demander, via ce protocole, une adresse IP et la configuration du réseau (Masque, adresse IP de la passerelle, serveurs DNS...)

- ▶ Il envoie un message broadcast
- ▶ Un serveur DHCP (normalement, un serveur pour tout le sous-réseau) se charge d'assigner les adresses, et de répondre.

Commandes : `dhcpcd` / `dhclient`

Algorithmes de routage sur Internet

Internet est un réseau de réseaux. Il n'y a pas un unique algorithme de routage. Chaque sous-réseau peut utiliser le sien.

Plusieurs algorithmes existent.

Pour les "Système Autonome" (FAI, RENATER...)

- ▶ RIP (Routing Information Protocol) : vecteurs de distance
- ▶ IGRP (Interior Gateway Routing Protocol) : vecteurs de distance
- ▶ OSPF (Open Shortest Path First) : état de liens
- ▶ IS-IS (Intermediate system to intermediate system) : état de liens

Entre système autonomes : des considérations économiques et politiques s'ajoutent. Par exemple : certains liens sont payants.

BRG (Border Gateway Protocol) : Vecteurs de chemins