

Routage et réseaux IP

C. Pham
Université de Pau et des Pays de l'Adour
Département Informatique
<http://www.univ-pau.fr/~cpham>
Congduc.Pham@univ-pau.fr



Copyright

- Copyright © 1998-2015 Congduc Pham; all rights reserved
- Les documents ci-dessous sont soumis aux droits d'auteur et ne sont pas dans le domaine public. Leur reproduction est cependant autorisée à condition de respecter les conditions suivantes :
 - Si ce document est reproduit pour les besoins personnels du reproducteur, toute forme de reproduction (totale ou partielle) est autorisée à la condition de citer l'auteur.
 - Si ce document est reproduit dans le but d'être distribué à des tierces personnes il devra être reproduit dans son intégralité sans aucune modification. Cette notice de copyright devra donc être présente. De plus, il ne devra pas être vendu.
 - Cependant, dans le seul cas d'un enseignement gratuit, une participation aux frais de reproduction pourra être demandée, mais elle ne pourra être supérieure au prix du papier et de l'encre composant le document
- Toute reproduction sortant du cadre précisé ci-dessus est interdite sans accord préalable écrit de l'auteur.

L'adressage IP

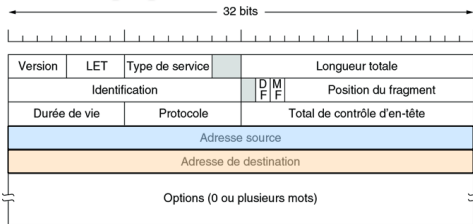
← 32 bits →

Classe	Plage des adresses d'hôtes
A 0	Réseau Hôte 1.0.0.0 à 127.255.255.255
B 10	Réseau Hôte 128.0.0.0 à 191.255.255.255
C 110	Réseau Hôte 192.0.0.0 à 223.255.255.255
D 1110	Adresse multicast 224.0.0.0 à 239.255.255.255
E 1111	Réservé pour une utilisation future 240.0.0.0 à 255.255.255.255

© Pearson Education France

- il n'y a pratiquement plus de classe A et B,
- certaines adresses sont réservées (11110*, 127.x.y.z),
- les adresses réseaux sont distribuées par le NIC (Network Information Center).

L'entête d'un paquet IP



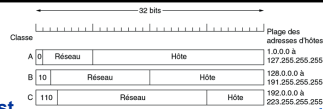
© Pearson Education France

- entête fixe de 20 octets, plus un champ option variable,
- les champs adresses sur 32 bits,
- taille maximale du paquet: 65535 octets.

Cours de C. Pham, Université de Pau

Routeur et Réseaux IP 4

L'adressage IP

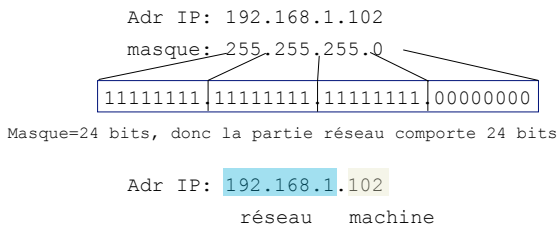


- Une adresse IP c'est
 - Une partie réseau qui détermine l'adresse de réseau
 - Une partie machine
 - Ex: 192.168.1.102
- L'adresse de réseau permet d'adresser toutes les machines d'un même réseau (analogie avec une adresse postale)
- Il faut savoir où se trouve la limite de la partie réseau et où commence la partie machine
 - Notion de masque de réseau
 - Adresse IP=32 bits, donc masque de réseau sur 32 bits
- Définition 1: le masque de réseau comporte (de gauche à droite) autant de « 1 » binaire que la partie réseau de l'adresse comporte de bits

Cours de C. Pham, Université de Pau

Routeur et Réseaux IP 5

Masque de réseau



La machine d'adresse **192.168.1.102** appartient au réseau **192.168.1.0** et a comme numéro **102** dans ce réseau

Cours de C. Pham, Université de Pau

Routeur et Réseaux IP 6

Pour que 2 machines puissent communiquer...

- Il faut qu'elles soient
 - physiquement connectées (sur le même bus, reliés à un commutateur/hub,...)

- Logiquement sur le même réseau: même adresse de réseau!

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 7

Est-on sur le même réseau?

Adr IP1: 192.168.1.102
 Adr IP2: 192.168.1.36
 masque: 255.255.255.0

11111111 | 11111111 | 11111111 | 00000000

Donc adresse de réseau=192.168.1.0

Adr IP1: 11000000.10101000.00000001.01100110
 et 11111111.11111111.11111111.00000000

réseau: 11000000.10101000.00000001.00000000

Adr IP2: 11000000.10101000.00000001.01100110
 11111111.11111111.11111111.00000000

réseau: 11000000.10101000.00000001.00000000

Même adresse de réseau=même réseau logique

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 8

Passerelle, gateways,...

- Dans un réseau local
- Tous les masques: 255.255.255.0

Sous Linux, la commande `route` permet d'indiquer l'accessibilité des réseaux distants

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 9

route sous Linux

■ Ajouter une route pour un réseau

```
- route [-v] [-A family] add [-net -host] target  
[netmask Nm] [gw Gw] [metric N] [mss M][window W]  
[irtt I] [reject] [mod] [dyn] [reinststate] [[dev]  
If]
```

```
- route add -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 eth1
```

■ Effacer une route

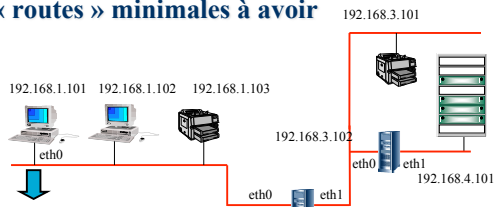
```
- route [-v] [-A family] del [-net|-host] target  
[gw Gw] [netmask Nm] [metric N] [[dev] If]
```

```
- Route del -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 eth1
```

■ Afficher les routes

```
- route  
- route -n : n'affiche pas les noms symboliques
```

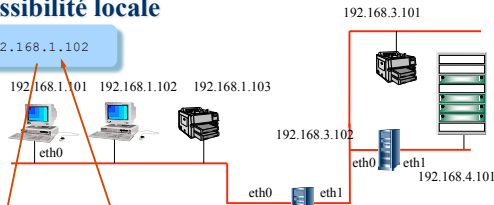
Les « routes » minimales à avoir



```
> ifconfig eth0 192.168.1.101 netmask 255.255.255.0  
> route  
Table de routage IP du noyau  
Destination Passerelle Genmask Indic Metric Ref Use Iface  
localnet * 255.255.255.0 U 0 0 0 0 eth0  
> route -n  
Table de routage IP du noyau  
Destination Passerelle Genmask Indic Metric Ref Use Iface  
192.168.1.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 0 0 0 0 eth0
```

Accessibilité locale

```
> ping 192.168.1.102
```



```
> ifconfig eth0 192.168.1.101 netmask 255.255.255.0  
> route  
Table de routage IP du noyau  
Destination Passerelle Genmask Indic Metric Ref Use Iface  
localnet * 255.255.255.0 U 0 0 0 0 eth0  
> route -n  
Table de routage IP du noyau  
Destination Passerelle Genmask Indic Metric Ref Use Iface  
192.168.1.0 0.0.0.0 255.255.255.0 U 0 0 0 0 eth0
```

Accessibilité distante (1)

> ping 192.168.3.101
> network unreachable

```

> route
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use  Iface
localnet    *            255.255.255.0  U     0     0    0    eth0

> route add -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 eth0
> route
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use  Iface
localnet    *            255.255.255.0  U     0     0    0    eth0
192.168.3.0 *            255.255.255.0  U     0     0    0    eth0
  
```

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 13

Accessibilité distante (2)

```

> ifconfig eth0 192.168.1.100 netmask 255.255.255.0
> ifconfig eth1 192.168.3.100 netmask 255.255.255.0
> route -n
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use  Iface
192.168.1.0  0.0.0.0     255.255.255.0  U     0     0    0    eth0
192.168.3.0  0.0.0.0     255.255.255.0  U     0     0    0    eth1
  
```

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 14

Accessibilité distante (3)

4 TCP UDP
3 Internet Protocol
2 Ethernet
1 Matériel

Drivers
Noyau

ARP 192.168.3.101?
Qui va répondre?

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 15

Accessibilité distante (4)

>ping 192.168.3.101
>network unreachable

```

> route
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use Iface
localnet    *            255.255.255.0  U     0     0     0 eth0
192.168.3.0 *            255.255.255.0  U     0     0     0 eth0

```

```

> route add -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 eth0
> route
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use Iface
localnet    *            255.255.255.0  U     0     0     0 eth0
192.168.3.0 *            255.255.255.0  U     0     0     0 eth0

```

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 16

Accessibilité distante (5)

>ping 192.168.3.101
>network unreachable

```

> route
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use Iface
localnet    *            255.255.255.0  U     0     0     0 eth0

```

```

> route add -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 eth0 gw 192.168.1.100
> route
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use Iface
localnet    *            255.255.255.0  U     0     0     0 eth0
192.168.3.0 192.168.1.100 255.255.255.0  UG    0     0     0 eth0

```

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 17

Accessibilité distante (6)

>ping 192.168.3.101

```

> route
Table de routage IP du noyau
Destination  Passerelle  Genmask      Indic Metric Ref   Use Iface
localnet    *            255.255.255.0  U     0     0     0 eth0
192.168.3.0 192.168.1.100 255.255.255.0  UG    0     0     0 eth0

```

ARP 192.168.1.100?

passerelle

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 18

Accessibilité distante (7)

192.168.3.101

```
> ifconfig eth0 192.168.1.100 netmask 255.255.255.0
> ifconfig eth1 192.168.3.100 netmask 255.255.255.0
> route -n
```

Destination	Passerelle	Genmask	Indic	Metric	Ref	Use	Iface
192.168.1.0	0.0.0.0	255.255.255.0	U	0	0	0	eth0
192.168.3.0	0.0.0.0	255.255.255.0	U	0	0	0	eth1

Cours de C. Pham, Université de Pau Routeur et Réseaux IP 19

Résumé (1)

192.168.3.101

```
> ifconfig eth0 192.168.1.101 netmask 255.255.255.0
> route add -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 gw 192.168.1.100
> route
```

Destination	Passerelle	Genmask	Indic	Metric	Ref	Use	Iface
localnet	*	255.255.255.0	U	0	0	0	eth0
192.168.3.0	192.168.1.100	255.255.255.0	UG	0	0	0	eth0

Cours de C. Pham, Université de Pau Routeur et Réseaux IP 20

Et le réseau 192.168.4.0 (1)?

192.168.3.101

```
> ping 192.168.4.101
```

```
> route add -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 gw 192.168.1.100
> route add -net 192.168.4.0 netmask 255.255.255.0 gw 192.168.1.100
> route
```

Destination	Passerelle	Genmask	Indic	Metric	Ref	Use	Iface
localnet	*	255.255.255.0	U	0	0	0	eth0
192.168.3.0	192.168.1.100	255.255.255.0	UG	0	0	0	eth0
192.168.4.0	192.168.1.100	255.255.255.0	UG	0	0	0	eth0

Cours de C. Pham, Université de Pau Routeur et Réseaux IP 21

Accessibilité vers un hôte particulier

```

> ping 10.100.100.4

> ifconfig eth0 192.168.1.100 netmask 255.255.255.0
> ifconfig eth1 192.168.3.100 netmask 255.255.255.0
> route add default gw 10.100.100.4

> route add -host 10.100.100.4 eth1
> route

```

Destination	Passerelle	Genmask	Indic	Metric	Ref	Use	Iface
192.168.1.0	*	255.255.255.0	U	0	0	0	eth0
192.168.3.0	*	255.255.255.0	U	0	0	0	eth1
10.100.100.4	*	255.255.255.255	UH	0	0	0	eth1

Cours de C. Pham, Université de Pau Route et Réseaux IP 25

Vers plus de dynamicité dans le routage

- Les commandes `route` (ou équivalentes) permettent d'indiquer des routes de manière manuelles et statiques
 - Difficile sur un réseau de grande dimension
 - Nécessite de connaître la topologie
 - Mise à jour difficile si la topologie change, si la configuration des machines change...
- Indiquer des routes statique n'est pas vraiment du routage, c'est ce que l'on appelle du « forwarding »
- Le vrai routage consiste à déterminer de manière automatique des tables de routage pour construire ensuite les tables de « forwarding »
- On va donc avoir des protocoles de routage permettant de construire les tables de routage

Cours de C. Pham, Université de Pau Route et Réseaux IP 26

Le visage de l'Internet aujourd'hui

- Les « 1st tier ISP » possèdent des lignes.
- L'interconnexion se produit essentiellement à des points de peering privé.

source: C. Diot, RHDM'00

Cours de C. Pham, Université de Pau Route et Réseaux IP 27

Introduction du routeur

```
>ifconfig eth0 10.0.0.45 netmask 255.255.255.0
>route add default gw 10.0.0.1
```

10.0.0.1

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 28

Routeurs

■ = passerelle avec matériel & logiciel dédiés

192.168.1.100 192.168.3.100
passerelle

Un routeur est un matériel réseau spécifique, conçu spécialement pour le routage. Faire un routeur avec un PC à plusieurs cartes est possible, mais peu efficace!

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 29

La diversité des réseaux

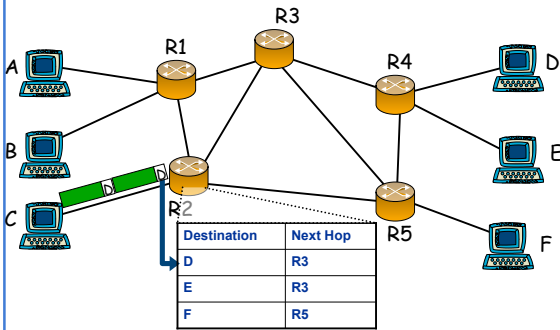
© Pearson Education France

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 30

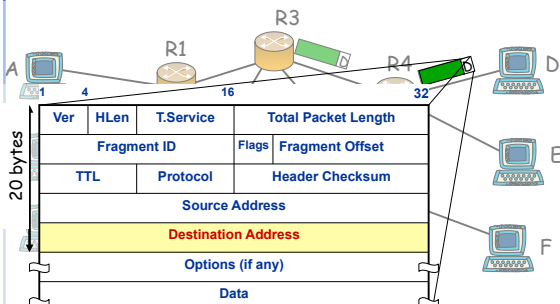
Le routeur et la fonction de routage, c'est...

- ...construire des tables de routage pour...
- ...déterminer la route d'une source vers une destination
 - Recevoir les paquets
 - Lire l'adresse de destination
 - Envoyer les paquets vers les bons liens de sortie
- Le plus souvent le routage est de proche-en-proche

Le routage de proche en proche illustré



Le routage IP



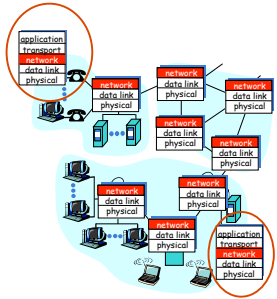
Architecture protocolaire

- Les éléments dans le réseau ne possèdent que les couche 1 à 3

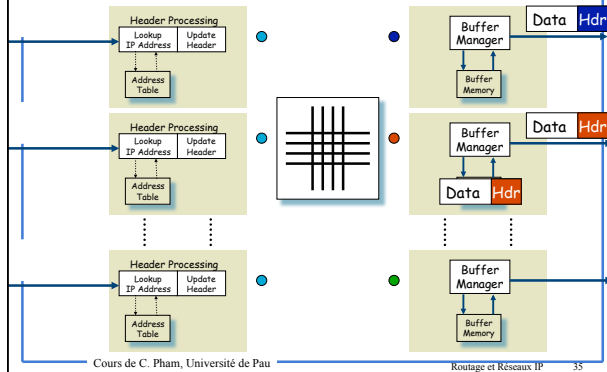
- Physique (ex: UTP)
- Liaison (ex: Ethernet)
- Réseaux (ex: IP)

- Seuls les éléments d'extrémités possèdent les autres couches

- Transport (ex: TCP)
- [Session]
- [Présentation]
- Application (ex: FTP)

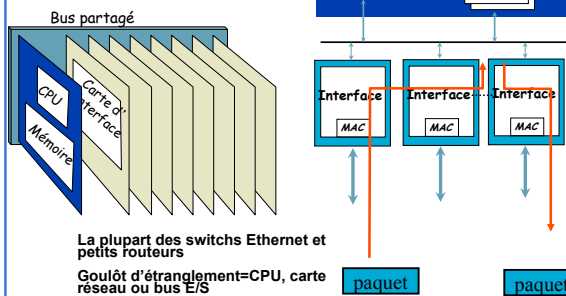


Architecture générique d'un routeur



Routeurs de 1^{ère} génération

environ 0.5Gb/s capacité agrégée



La plupart des switches Ethernet et petits routeurs

Goulot d'étranglement=CPU, carte réseau ou bus E/S

Quelques exemples de routeurs

Cisco SOHO
Ethernet, ADSL

Cisco 800
Ethernet, ADSL,
RNIS, Serial, VPN

Cisco 1700
Ethernet, ADSL,
T1/E1, FR, X25,
VLAN, VPN

©Juniper

©Alcatel

and more...

©Nortel Networks

Cours de C. Pham, Université de Pau

37 Routage et Réseaux IP

Vue interne d'un routeur Cisco 2600

Power Supply

Flash SIMM

Boot ROM

RAM DIMMs

CPU

Cours de C. Pham, Université de Pau

38 Routage et Réseaux IP

Routeur Cisco 2600, vue des connexions

Serial Ports

FastEthernet Ports

Console Port

Auxiliary Port

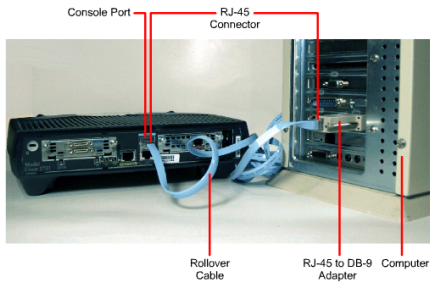
Power Switch

Power Cord Connection

Cours de C. Pham, Université de Pau

39 Routage et Réseaux IP

Configuration d'un routeur

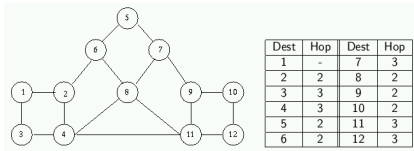


Cours de C. Pham, Université de Pau

Routeur et Réseaux IP 40

Routing: principes de base

- Un algorithme de routage remplit une table de routage dans les routeurs



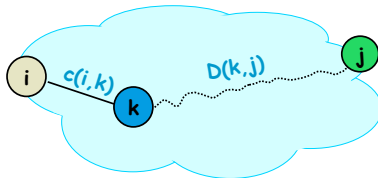
- Idée: échanger des messages pour connaître les voisins de ses voisins!

Cours de C. Pham, Université de Pau

Routeur et Réseaux IP 41

Critère de "consistance"

- Un sous-ensemble d'un plus court chemin est aussi le plus court chemin entre les 2 nœuds intermédiaires
- Corollaire:
 - Si le plus court chemin d'un nœud i à un nœud j , avec une distance de $D(i,j)$ passe par un nœud voisin k avec un lien de coût $c(i,k)$, alors: $D(i,j) = c(i,k) + D(k,j)$



Cours de C. Pham, Université de Pau

Routeur et Réseaux IP 42

Connaître les voisins de ses voisins...

- Un routeur connaît ses voisins directement connectés...
- ...ainsi que le "coût" pour y aller
- Coût = métrique pour comparer les routes entre elles
 - La route la plus "courte" est celle dont le coût est minimal
 - Voisin direct = 1 saut, donc coût de 1 si la métrique est le nbr de saut
 - Voisin direct donc on connaît le débit du lien physique avec lequel on est connecté: débit faible=grand coût
- Par propagation des informations de voisinage et de coût, chaque routeur va construire une table de routage

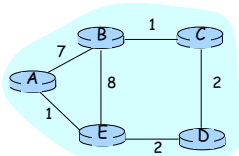
Notion de convergence

- On parle de convergence lorsque tous les routeurs ont la même information de routage
- En cas de non convergence, les ressources du réseau peuvent être inaccessibles
 - Les paquets sont acheminés vers d'autres destinations.
 - On parle de trou noir "Black holes" (les paquets disparaissent)
 - Bouclage du processus de routage (routing loops)
- Le processus de convergence est déclenché après changement d'état d'un routeur ou d'un lien.

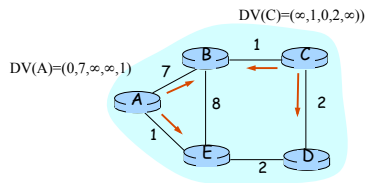
L'approche vecteur de distance (1)

- Vecteur de distance (Distance-Vector, DV)
 - chaque routeur ne connaît initialement que le coût de ses propres liaisons vers ses voisins direct. C'est le vecteur initial
 - chaque routeur va échanger son vecteur initial avec tous ses voisins
 - après un certain nombre d'itérations, chaque routeur va connaître le coût vers chaque destination,
 - fonctionne bien sur des systèmes de petite taille.

$$DV(A)=(0,7, \infty, \infty, 1)$$



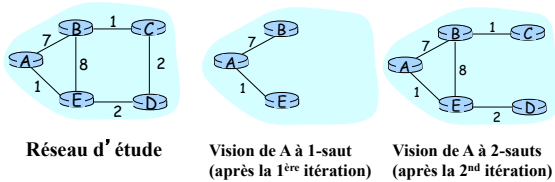
L'approche vecteur de distance (2)



Pas obligatoirement de synchronisation dans les envois de messages

L'approche vecteur de distance (2)

- **Condition de consistance:** $D(i,j) = c(i,k) + D(k,j)$
- **L' algorithme DV (Bellman-Ford) évalue cette condition de manière récursive**
 - À la m-ième itération, le critère de consistance est vérifié, en supposant que chaque nœud N "voit" les nœuds et les liens à m-sauts (ou moins) de lui (i.e. on a une vision à m-sauts)



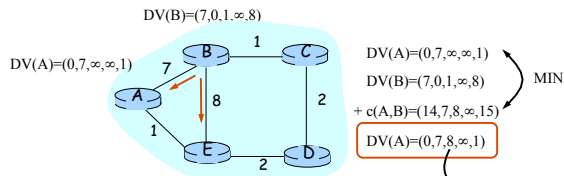
Algorithme DV (1)

- **Valeurs initiales (itération 1):**
 - $D(i,i) = 0$;
 - $D(i,k) = c(i,k)$ si k est un voisin (i.e. k est à 1 saut); et
 - $D(i,j) = \text{INFINITY}$ pour tous non-voisin j.
- **$D(i,*)$ est le vecteur de distance du nœud i.**
- **L' algorithme maintient une table de "forwarding" pour toute destination j, initialisée comme suit:**
 - $\text{Prochain-saut}(i) = i$;
 - $\text{Prochain-saut}(k) = k$ si k est un voisin, et
 - $\text{Prochain-saut}(j) = \text{INCONNU}$ si j n' est pas un voisin.

Algorithme DV (2)

- Après chaque itération chaque noeud i échange son vecteur de distance $D(i,*)$ avec ses voisins directs.
- Pour tout voisin k, si $c(i,k) + D(k,j) < D(i,j)$, alors:
 - $D(i,j) = c(i,k) + D(k,j)$
 - prochain-saut(j) = k
- Après chaque itération, le critère de consistance est vérifié
 - Après m itérations, chaque nœud connaît le plus court chemin vers tous les autres nœuds situés à m sauts ou moins.
 - i.e. chaque nœud a une vision à m sauts du réseau.
 - L' algorithme converge en $O(d)$ itérations: d est le diamètre maximum du réseau.

Algorithme DV (3)

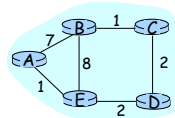


- A reçoit de B: $DV(B,*) = (7, 0, 1, \infty, 8)$
- Pour tout voisin k, si $c(i,k) + D(k,j) < D(i,j)$, alors:
 - $D(i,j) = c(i,k) + D(k,j)$
 - prochain-saut(j) = k
- Pour voisin B, si $c(A,B) + D(B,C) < D(A,C)$, alors:
 - $D(A,C) = c(A,B) + D(B,C)$
 - prochain-saut(C) = B

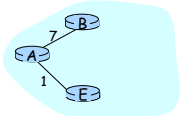
Algorithme DV (4)

■ Vecteur de distance de A: $D(A,*)$:

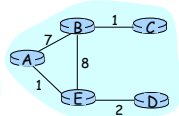
- Après Itération 1 est: [0, 7, INFINITY, INFINITY, 1]
- Après Itération 2 est: [0, 7, 8, 3, 1]
- Après Itération 3 est: [0, 7, 5, 3, 1]
- Après Itération 4 est: [0, 6, 5, 3, 1]



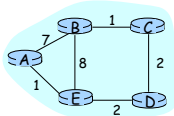
Réseau d' étude



Vision de A à 1-saut (après la 1^{ère} itération)



Vision de A à 2-sauts (après la 2^{ème} itération)



Vision de A à 3-sauts (après la 3^{ème} itération)

Pas à pas...au tableau

Pour pouvoir le faire, il faut fixer l'ordre des routeurs pour l'envoi des messages: B, C, D, E

Réseau d'étude

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 52

Vecteur de distance en pratique (1)

B	s1
E	s0

↓

B	s1
C	s1
E	s0

Réseau d'étude

$DV(A) = (0, 7, \infty, \infty, 1)$
 $DV(B) = (7, 0, 1, \infty, 8)$
 $+ c(A, B) = (14, 7, 8, \infty, 15)$
 $DV(A) = (0, 7, 8, \infty, 1)$

MIN

Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 53

Vecteur de distance en pratique (2)

132.16.1.0	s1
142.78.7.0	s0

132.16.1.101 132.16.1.102 132.16.1.103

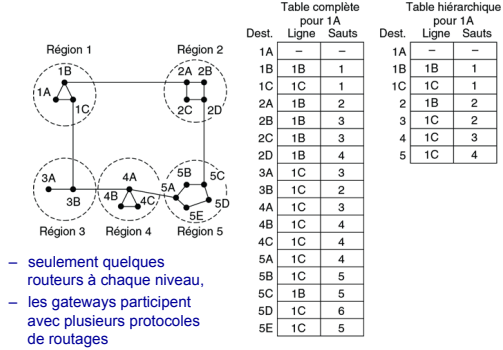
132.16.1.0

142.78.7.3 142.78.7.4 142.78.7.5

142.78.7.0

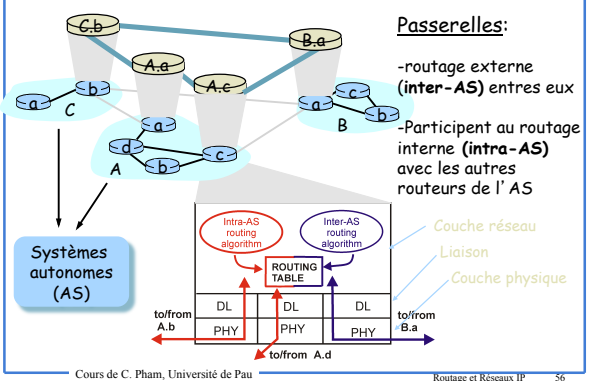
Cours de C. Pham, Université de Pau Routage et Réseaux IP 54

Le routage hiérarchique

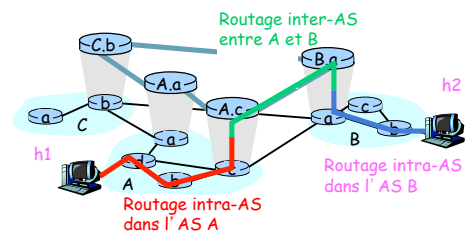


- seulement quelques routeurs à chaque niveau,
- les gateways participent avec plusieurs protocoles de routages

Le vrai routage dans l'Internet



Exemple de routage interne et externe

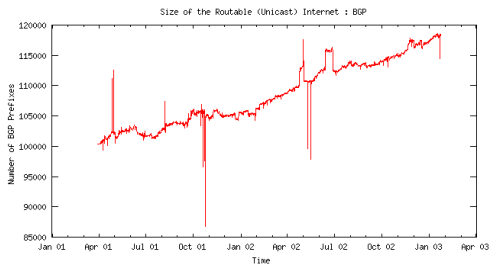


Seulement quelques routeurs (de 0 à 50) dans chaque AS

Les protocoles de routage (interne)

- **RIP (v1 et v2)**
 - Routing Information Protocol, v2 supporte le VLSM
 - Nombre de saut comme métrique
 - Nombre de saut maximum = 15
 - Mise à jour des tables de routage toutes les 30s
- **IGRP**
 - Interior Gateway Routing Protocol (Cisco)
 - Bande passante et délai comme métrique
 - Mise à jour des tables de routage toutes les 30s
- **OSPF**
 - Open Shortest Path First, supporte le VLSM
 - Notion de zones administratives
 - Utilise SPF (Dijkstra) pour calculer le plus court chemin
 - Le coût d'un lien dépend de la capacité (10⁹/capacité)
 - Paquet HELLO toutes les 10s ou 30s
- **EIGRP**
 - Enhanced IGRP (Cisco), supporte le VLSM
 - Utilise l'équilibrage
 - Utilise DUAL (Diffused Update Algorithm) pour calculer le + court chemin

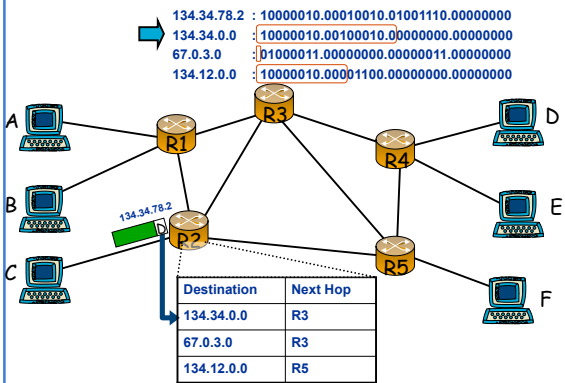
Evolution du nombre d'entrée dans un routeur inter-domaine BGP (2)



Cours de C. Pham, Université de Pau

Routage et Réseaux IP 59

Ce qu'il y a vraiment dans les tables



Cours de C. Pham, Université de Pau

Routage et Réseaux IP 60

Contraintes de performance

- Avec les débits actuellement rencontrés, un routeur doit effectuer des millions d'opérations à la seconde

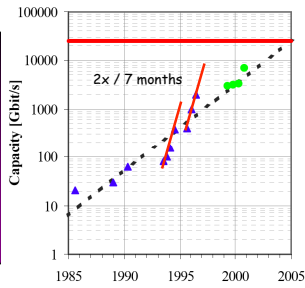
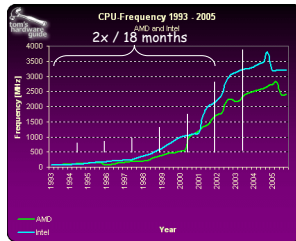
Année	Débit ligne Gbits/s	40B (Mpps)	84B (Mpps)	354B (Mpps)
1997-98	0.155	0.48	0.23	0.054
1998-99	0.622	1.94	0.92	0.22
1999-00	2.5	7.81	3.72	0.88
2000-01	10.0	31.25	14.88	3.53
2002-03	40.0	125	59.52	14.12
2004-05	160.0	500	238,08	56,48
2006-2008	320.0	1000	476,16	112,96
GEthernet	1.0	3.13	1.49	0.35

Cours de C. Pham, Université de Pau

Routeur et Réseaux IP 61



La révolution optique!



Source : Optical fibers for Ultra-Large Capacity Transmission • by J. Grochocinski
