

# Algorithmes de routage IP

## 1 Contexte, rappels et introduction au routage Internet

Filière F5 - Isima 2010-2011 (slides élaborés en 2005/2006)

Mickael Meulle

[mickael@meulle.com](mailto:mickael@meulle.com)

[michael.meulle@orange-ftgroup.com](mailto:michael.meulle@orange-ftgroup.com)

## Plan

### 1. Généralités sur les réseaux IP

- 1.1 Quelques rappels sur la couche réseau IP
- 1.2 Adressage et DNS
- 1.3 Les regroupements IP, les classes, CIDR

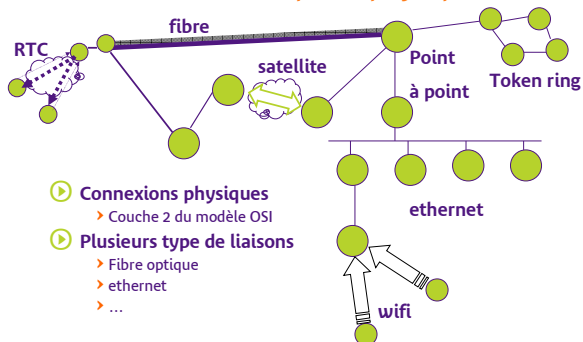
### 2. Le routage IP et L'Internet

- 2.1 Les communications IP et le routage en général
- 2.2 L'Internet, les réseaux, les AS
- 2.3 Le routage IP dans l'Internet: statique/dynamique, intra/inter AS
- 2.4 Les plus courts chemins dans les graphes
- 2.5 différents types de protocoles de routage
- 2.6 Le routage Internet de 1980 à 2005

## 1. Généralités sur les réseaux IP

- 1.1 Quelques rappels sur la couche réseau IP
- 1.2 adressage et DNS
- 1.3 Les regroupements IP, les classes, CIDR

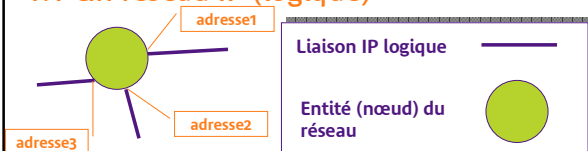
## 1. Un réseau informatique (« physique »)



Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

DE

## 1.1 Un réseau IP (logique)

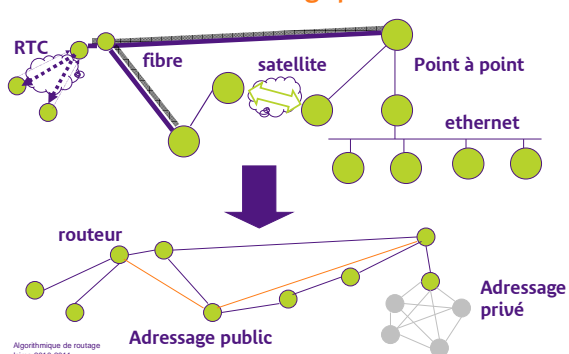


- ▶ **Connexions logiques**  
[ les liaisons ne sont plus les liaisons physiques ]
  - Couche 3 du modèle OSI
  - « IP over everything »
- ▶ **Chaque entité dispose d'une ou plusieurs interfaces, chaque interface ayant une (quelquefois plusieurs) adresse(s) IP**

Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

DE

## 1.1 Liaisons IP sont logiques



Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

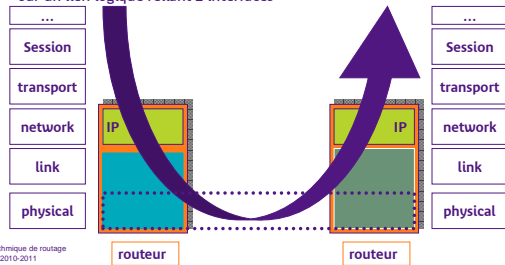
DE

## 1.1 Protocoles et couches (rappels)

### ➤ Modèle OSI = Architecture en couches (layers)

### ➤ On va se limiter à la couche IP seulement

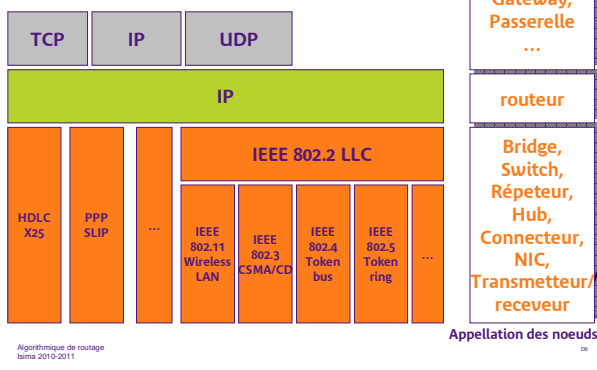
➤ La propagation des données est assurée de façon transparente par la couche 2 sur un lien logique reliant 2 interfaces



Algorithmique de routage  
Ismaïl 2010-2011

07

## 1.1 La couche IP est fédératrice...



Algorithmique de routage  
Ismaïl 2010-2011

Appellation des noeuds

08

## 1.1 IP brièvement

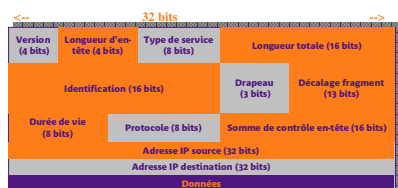
### ➤ « Internet Protocol », créé en 1970,

### ➤ maintenant standard des OS modernes pour communiquer en utilisant des protocoles de plus haut niveau comme tcp, http...

### ➤ IP version 4, IP version 6 (« next generation networks»)

### ➤ entêtes IPv4:

- ④ Adresses source et destination
- ④ Durée de vie (ttl)  
(Décrémenté à chaque bond)
- ④ IP id, drapeaux, Checksum...



Algorithmique de routage  
Ismaïl 2010-2011

09

## 1. Généralités sur les réseaux IP

1.1 Quelques rappels sur couche réseau IP

**1.2 adressage et DNS**

1.3 Les regroupements IP, les classes, CIDR

## 1.2 Adressage IP

▶ A chaque interface correspond au moins une adresse IP

▶ Il y a deux versions du protocole IP

▶ définit deux types de réseaux (interconnectables par passerelles)

▶ Notation ipv4 (32 bits):

▶ 00001010 00000000 00000000 00000001 (notation décimale)

▶ 10.0.0.1 (notation pointée)

▶ 0.0.0.0 -> 255.255.255.255.

– 4,294,967,296 adresses au total

▶ Notation ipv6 (128 bits)

▶ 300,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000

▶ Notation usuelle: E3D7:0000:0000:0000:51F4:9BC8:CoA8:6420

▶ Notation courte: E3D7::51F4:9BC8:CoA8:6420

▶ Notation mixte: E3D7::51F4:9BC8:192.168.100.32

▶ Presque  $2^{128}$  adresses possibles !

Au cas où mon grille pain voudrait une  
adresse ipv6...

## 1.2 Les hommes préfèrent les noms explicites: le service DNS ou « Domain Name System »

► Nommage hiérarchique des machines munies d'adresses IP

► Il existe des serveurs DNS organisés hiérarchiquement qui associent un nom à une adresse IP et vice versa

► les serveurs maîtres (root) ipv6 ont été ajouté récemment (juillet 2004)

► DNS est un système distribué qui fonctionne sur le système client/serveur

► Les serveurs DNS répondent à des requêtes de « résolution »  
– Nom->adresse et adresse->nom

► Sans routage(cf. plus loin), un service comme DNS aurait du mal fonctionner: les protocoles vont utiliser les adresses IP pour communiquer!

## 1. Généralités sur les réseaux IP

1.1 Quelques rappels sur la couche réseau IP

1.2 adressage et DNS

1.3 Les regroupements IP, les classes, CIDR

### 1.3 IPv4: Les classes d'adresses

► 5 classes A,B,C,D,E + exceptions

► Les classes sont contiguës,

afin de pouvoir créer des plages

► Exemple: la plage totale pour les adresses de classe C:  
– 110xxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx

► La classe E est réservée et non praticable sur Internet

► Une partie de la classe E est spéciale

– Adresse 255.255.255.255 limitée au broadcast sur LAN

– Adresses 255.0.0.0 -> 255.255.255.255 réservées pour le broadcast

► La classe D est réservée pour le fonctionnement multicast

► Le multicast consiste à envoyer des paquets à plusieurs adresses de machines plutôt qu'à une seule (unicast)

► La classe D et la classe E sont des adressages Internet non valides.

Classe	Bits les plus à gauche	Adresse de début	Adresse de fin
A	0xxxx	0.0.0.0	127.255.255.255
B	10xxx	128.0.0.0	191.255.255.255
C	110xx	192.0.0.0	223.255.255.255
D	1110	224.0.0.0	239.255.255.255
E	1111	240.0.0.0	255.255.255.255

### 1.3 IPv4: Les classes (2)

#### ▶ classes A,B,C +exceptions

➤ Usage commun sur les réseaux IP

#### ▶ Exceptions:

➤ Loopback: **127.0.0.1**

– 127.0.0.0 -> 127.255.255.255 réservées pour utilisations « loopback »

➤ Les adresses « nulles » sont interdites sur l'Internet et elles n'ont pas de fonction particulières

– 0.0.0.0 -> 0.255.255.255

➤ Les usages privés (intranets)

Classe	Adresse de début	Adresse de fin
A	10.0.0.0	10.255.255.255
B	172.16.0.0	172.31.255.255
C	192.168.0.0	192.168.255.255

➤ Usages: <http://www.iana.org/assignments/ipv4-address-space>

### 1.3 IPv6: pas de classes

#### ▶ Trois types: unicast, multicast, anycast

➤ Unicast et multicast conceptuellement pareil à ipv4

– Les adresses multicast ipv6 commencent par 'FF' (255) comme en ipv4

➤ Anycast envoie un seul paquet parmi un groupe

(multicast pour sa part envoie à tous le groupe)

– Concepts avancés de load-balancing ou faire face à la rupture de liens

#### ▶ Peu d'adresses" spéciales"

➤ 0:0:0:0:0:0:0:0 interne à l'implémentation du protocole

➤ 0:0:0:0:0:0:0:1 pour le loopback (cf. 127.0.0.1 en ipv4)

➤ Usages: <http://www.iana.org/assignments/ipv6-address-space>

### 1.3 Dénombrements IP



#### ▶ Partitionnement haut niveau: les réseaux sont de classe A,B ou C

➤ Plusieurs partitionnement possibles sur un même segment

Classe	Intervalle d'adresses	Adresses libres	Masque d'adresse par défaut
A	0.0.0.0 - 127.255.255.255	4.0.0.0	255.0.0.0
B	128.0.0.0 - 191.255.255.255	16.0.0.0	255.255.0.0
C	192.0.0.0 - 223.255.255.255	1.0.0.0	255.255.255.0

➤ Par exemple toutes les machines ayant l'adresse 4.x.x.x appartiennent au même réseau « 4.0.0.0 » et le masque correspondant est 255.0.0.0

➤ Le groupements permettent une meilleure gestion de la sécurité, et l'identification de groupes de machines (pour la gestion des trafics par exemple).

### 1.3 Dénombrements IP: CIDR (classless routing)

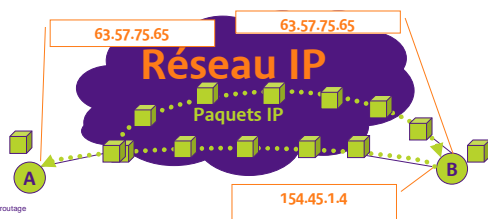
- ▶ « Classless Inter domain routing », 1990's. (« supernetting » )
- ▶ Permet un découpage plus fin des réseaux
- ⊗ mais avec des plages adjacentes!
  - Appelés préfixes CIDR
  - Format: xxx.xxx.xxx.xxx/n ( adresse\_ip/ masque\_reseau )
    - Le masque est le nombre de bits (le plus à gauche) signifiant le découpage de la plage d'adresse (i.e. le nombre de « bits significatifs »)
      - les n premiers bits sont invariables pour toutes les adresses appartenant au préfixe CIDR
- ▶ En ipv4:
  - Exemple: 192.168.12.0/23 , Masque 255.255.254.0 , intervalle 192.168.12.0 - 192.168.13.255
  - Exemple: 10.4.12.0/22 (10.4.12.0 - 10.4.15.255 , masque 255.255.252.0 )
    - 4 réseaux de classe C
  - Dans les réseaux non-CIDR, les valeurs imposées de « n » sont donc
    - (Classe A), 16 (Classe B), 24 (Classe C)
- ▶ IPv6 supporte pleinement CIDR
- ▶ Un regroupement de réseau s'appelle quelquefois une agrégation

## 2. Le routage IP et L'Internet

- 2.1 Les communications IP et le routage en général
- 2.2 L'Internet, les réseaux, les AS
- 2.3 Le routage IP dans l'Internet: statique/dynamique, intra/inter AS
- 2.4 Les plus courts chemins dans les graphes
- 2.5 différents types de protocoles de routage
- 2.6 Le routage Internet de 1980 à 2005

## 2. Les Communications au niveau IP

- ▶ Commutation de paquets
  - Les paquets envoyés par A vont être acheminés de proche en proche jusqu'à B et inversement (les chemins aller et retour ne sont en général pas les mêmes)
- ▶ Deux machines du réseaux doivent avoir la possibilité de communiquer:  
*exemple en IP version 4*



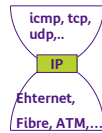
## 2. Les Communications au niveau IP

### ▶ Technologies et transports hétérogènes autour de la couche IP

- Le service assuré par la couche IP est minimaliste
- La gestion est décentralisée

### ▶ La lentille IP:

- « IP over everything »



### ▶ IP ne nécessite pas de fiabilité

- Gérer par les couches plus hautes et de bout en bout
  - Contrôle de flux, gestion des erreurs (réémission), congestion, ...

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.1 les Communications IP



### ▶ Les informations sont commutées sous forme de paquets

#### ⊗ Le protocole IP est non connecté

- Chaque paquet est émis de façon indépendante
- Pas d'établissement d'appels ou d'allocation de circuit virtuel
  - Pas de concept de connexion au niveau de la couche réseau
- Un paquet n'est pas obligé de suivre la même route que ses prédécesseurs
- Les paquets peuvent arriver dans le désordre
- Pas d'état concernant les flots dans les routeurs
- Pas d'état dans le réseau
- Les paquets IP peuvent arriver en double, ou bien ne pas arriver du tout!
- Réseau dit de « best effort »

### ▶ Plusieurs paquets peuvent arriver en même temps et être amenés à sortir sur le même lien

- Les routeurs ont des buffers

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.1 Le « routage »

### ▶ Le routage est la fonction de base d'un réseau IP

### ▶ Le routage assure que des informations acceptées pour transfert par une machine source S soient véhiculées vers la(les) destination(s) correcte(s) indiquée(s) par S, à un niveau raisonnable de performance...

- Une seule destination: routage unicast
- Plusieurs destinations: routage multicast

---

---

---

---

---

---

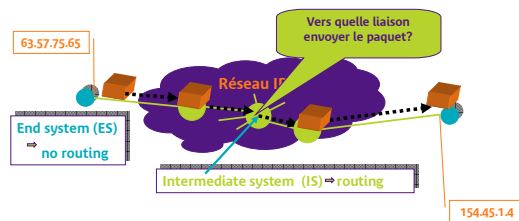
---

---



## 2.1 La problématique du routage unicast (sur IP)

- ▶ Étant donné une interconnexion de réseaux (IP),
  - Chaque routeur doit savoir où envoyer un datagramme selon sa destination (et éventuellement sa provenance)



## 2.1 Le « routage unicast »

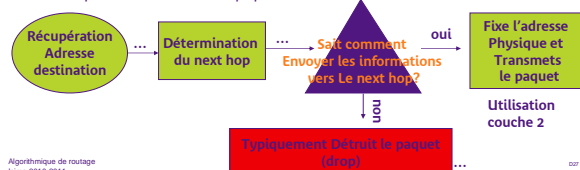
- ▶ Le routage unicast est l'acheminement de paquets d'un hôte source vers un hôte destination
- ▶ Routing ≠ Bridging (connexions de pont)
  - Bridging (layer 2), Routing (layer 3)
  - Les informations manipulées ne sont pas les mêmes
  - Le même type de tâche est accompli mais de façon différente
  - Les routeurs doivent être configurés (contrairement aux ponts)
- ▶ Le routage a été très étudié pendant 20 ans
  - Popularité commerciale au milieu des années 80.
- ▶ Le routage consiste en deux activités principales:
  - ⊗ Transporter des groupes d'informations (paquets)
    - Pas si difficile
  - ⊗ Déterminer les chemins vers les destinations du réseau
    - Peut être très complexe

## 2.1 Le transport des paquets: switching

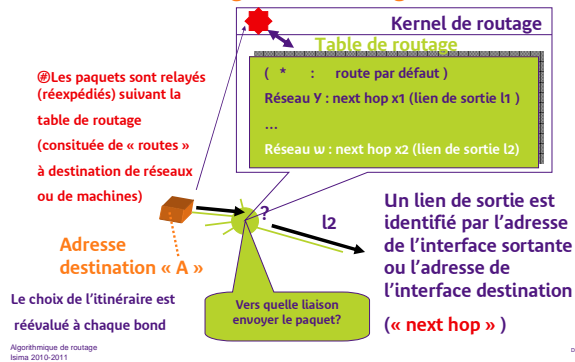
c'est simple en général...

- ▶ Dans la plupart des cas, un hôte doit envoyer des paquets vers un autre hôte

- Après avoir récupéré l'adresse de la destination, l'hôte envoie les paquets spécifiquement à une adresse physique (une machine qui n'est pas forcément l'hôte destination mais le prochain bond IP) mais en marquant l'adresse protocolaire couche réseau de l'hôte destination
  - Les routeurs doivent connaître les adresses des machines et des ponts vers lesquelles elles envoient les paquets



## 2.1 Table de routage (forwarding table)




---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.1 l'alimentation des tables de routage

- 🕒 Selon les besoins, la taille, l'homogénéité des machines, la topologie, la configuration et la sécurité désirée du réseau
- Alimentation Statique
    - L'« Operating System » (OS) permet à un administrateur de modifier la table de routage,
    - Le switching des paquets est effectué
      - Par l'OS (cf. kernel linux)
      - Par un kernel de switching (programme fonctionnant sur la machine)
  - Alimentation Dynamique
    - Un mécanisme d'alimentation des tables de routage (protocole de routage IP) est mis en jeu via l'implémentation d'un programme daemon déployé sur les machines du réseau
    - La mise en œuvre est plus complexe, mais la solution est beaucoup plus robuste et quasi-obligatoire lorsque la taille du réseau devient grande

---

---

---

---

---

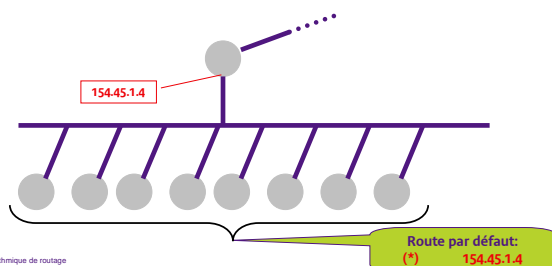
---

---

---

## 2.1 Routage trivial

- 🕒 Notion de « route par défaut »




---

---

---

---

---

---

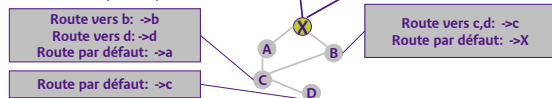
---

---

## 2.1 Alimentation manuelle des tables de routage: « Routage statique »

### ▶ Les tables de routage peuvent être configurées manuellement sur les routeurs

- ▶ Le plus efficace
- ▶ Exemple simple:



- ▶ On peut utiliser un outil gestionnaire de configuration automatique pour augmenter la vitesse de déploiement sur les machines

- ▶ A chaque problème sur un lien ou un nœud, ou à chaque ajout de liaison ou de machine

Algorithme de routage  
Isma 2010-2011

001

---

---

---

---

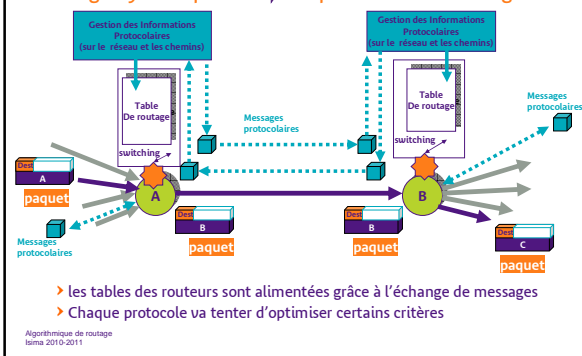
---

---

---

---

## 2.1 Alimentation dynamique des tables de routage: « routage dynamique » ➡ Les protocoles de routage



- ▶ les tables des routeurs sont alimentées grâce à l'échange de messages
- ▶ Chaque protocole va tenter d'optimiser certains critères

Algorithme de routage  
Isma 2010-2011

002

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.1 Alimentation dynamique des tables de routage: Les protocoles de routage IP

### ▶ Les protocoles de routage construisent les tables des routeurs

- ▶ Pas d'intervention de l'administrateur après configuration du protocole

### ▶ Si un routage donné contient au moins une boucle pour un chemin de 0 vers D

- ▶ Le paquet sera détruit une fois le ttl à 0

### ▶ les tables des routeurs sont alimentées grâce à l'échange de messages protocolaires

- ▶ Si un routeur tombe en panne, les voisins le détectent
  - Les tables de routage sont mises à jour (suite à l'échange de paquets de contrôle) et après convergence, les routes qui empruntaient le nœud ont disparues
- ▶ Conséquence: Le routage IP est dynamiquement adaptatif

### ▶ Les tables de routage doivent être cohérentes entre elles

Algorithme de routage  
Isma 2010-2011

003

---

---

---

---

---

---

---

---

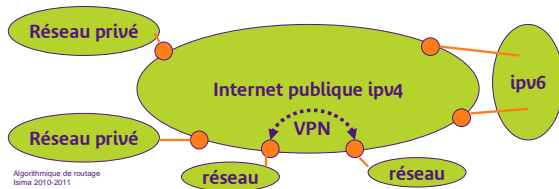
## 2. Le routage IP et L'Internet

- 2.1 Les communications IP et le routage en général
- 2.2 L'Internet, les réseaux, les AS**
- 2.3 Le routage IP dans l'Internet: statique/dynamique, intra/inter AS
- 2.4 Les plus courts chemins dans les graphes
- 2.5 différents types de protocoles de routage
- 2.6 Le routage Internet de 1980 à 2005

### 2.2 L'Internet: IPv4 public/privé, ipv6

#### L'Internet a plusieurs faces

- 1 seul réseau public ipv4
- des réseaux ipv6 interconnectés par des « passerelles »
- Une multitude de réseaux privés interconnectés par des « Gateway »
  - Le NAT (network address translation) par exemple permet à un réseau avec des adresses privées d'échanger des paquets IP avec la partie publique de l'Internet.



### 2.2 Généralités sur les LAN,MAN,WAN connectés à l'Internet, les réseaux clients, les fournisseurs de contenu

#### Une petite entité administrative peut:

- connecter son réseau privé à un opérateur avec des solutions diverses (RTC, ADSL, NAT, Liaisons point à point,...)
  - Seul les machines en vision directe de l'opérateur ont un adressage public (parmi une des plages de l'opérateur)
- Connecte son réseau public à des fournisseurs Internet (ISP) et d'autres réseaux
  - Sa plage d'adresse peut être allouée parmi celle de l'opérateur
  - Sa plage d'adresse peut avoir été achetée à un tiers
- Relier différents sites par l'intermédiaire d'un ISP
  - encapsulation VPN,...

#### Un fournisseur de contenu conséquent (comme « akamai ») disposant d'un réseau très étendu

- A acheter de plages d'adresses publiques
- Est connecté à de multiples opérateurs (multi homing) en de multiples villes (il peut avoir un réseau international ou non)

[illegible]

---

---

---

---

---

---

## 2.2 Les réseaux des opérateurs

- ▶ On parle de « backbone » ou d'épine dorsale pour un réseau géographiquement grand
  - ▶ Notion historique
- ▶ Au niveau IP, Le backbone d'un opérateur est formé de routeurs
  - ▶ Les routeurs de backbone sont regroupés géographiquement dans des **PoP**
    - « Point of presence » : points de concentration géographique de ressources
  - ▶ Les routeurs des PoP sont connectés entre eux,
  - ▶ Les routeurs des PoP sont connectés au réseau d'accès de l'opérateur (interconnexion clientes)
  - ▶ Les routeurs des PoP sont connectés aux réseaux voisins
    - Appelés alors routeurs de bordure

Algorithmique de routage  
Juin 2010-2011

038

---

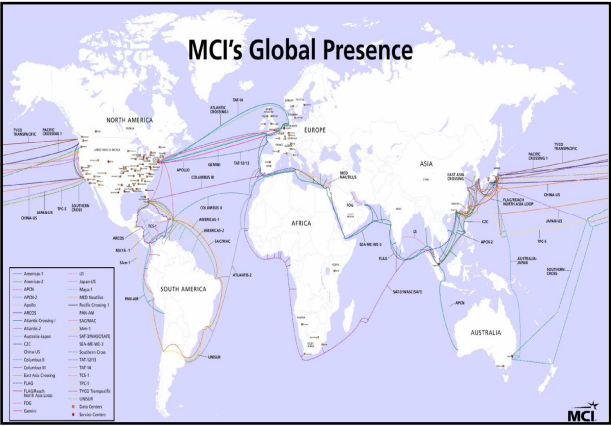
---

---

---

---

---



---

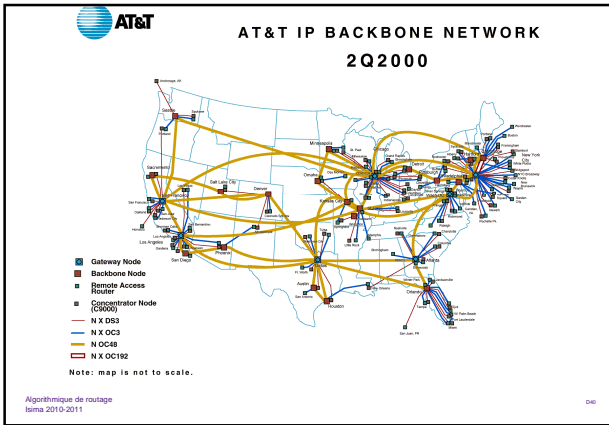
---

---

---

---

---




---

---

---

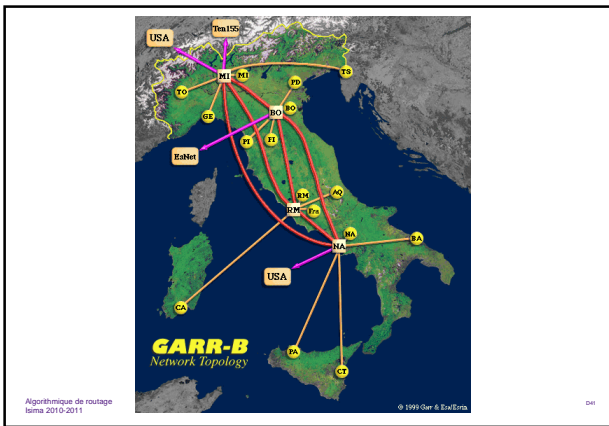
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---




---

---

---

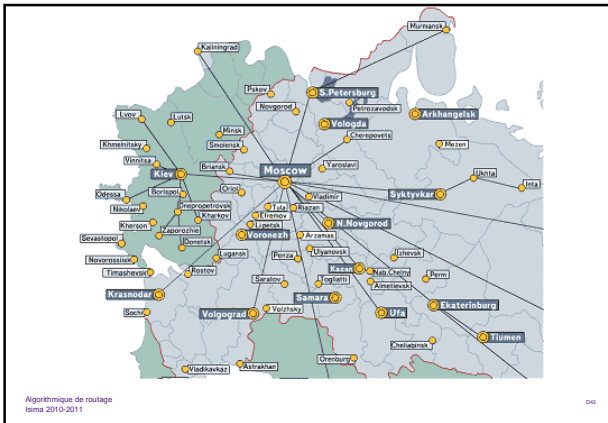
---

---

---

---

---




---

---

---

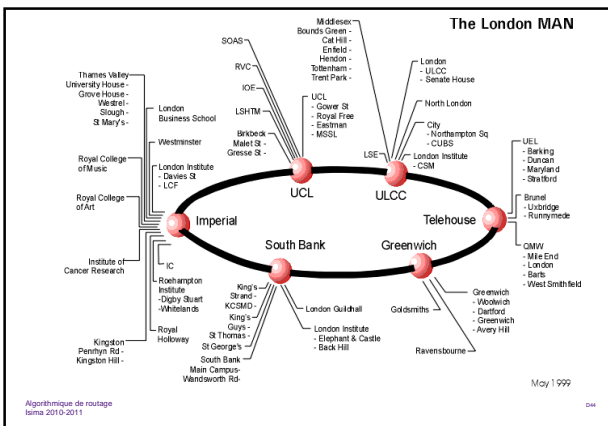
---

---

---

---

---




---

---

---

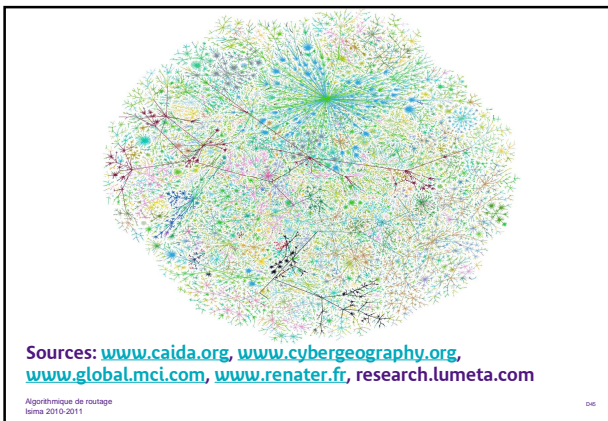
---

---

---

---

---




---

---

---

---

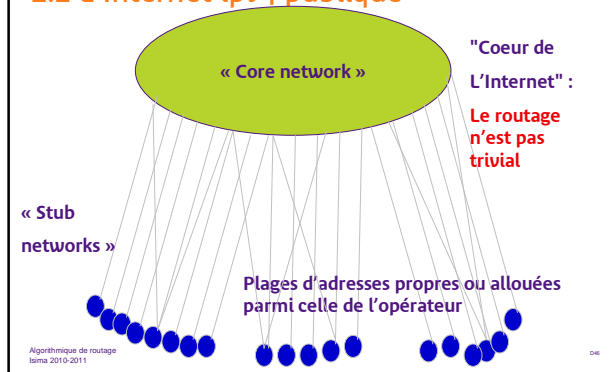
---

---

---

---

## 2.2 L'Internet ipv4 publique



---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.2 Organisation de l'Internet global: le cloisonnement en domaines (AS)

- ▶ Un réseau: Routeurs, liens, hôtes, et LAN
- ⊕ Chaque réseau est géré de façon indépendante par son détenteur
  - le routage doit être cohérent à l'intérieur d'un réseau
  - Les équipements sont administrés ensemble
- ▶ Taille des réseaux très variable
  - En terme d'adresses IP réservées, en terme géographique, en terme de nombre de ressources, en terme de capacités des liens (bande passante), en nombre de liaisons d'interconnexions
- ▶ On parle de Systèmes autonomes
  - « Autonomous System » (AS)
- ▶ Les paquets voyagent de routeurs en routeurs
  - De réseau en réseaux...

Algorithmique de routage Isma 2010-2011

DAE

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.2 Les AS

- ▶ Un AS délimite une portion d'un réseau sous la même autorité administrative et régie par les mêmes règles d'administration (en particulier pour le routage et les règles d'interconnexion)
- ▶ Identifiés par des numéros sur 16 bits assignés par l'IANA
  - de 1 à 65535
  - 64512-65535 : réservés pour les AS « privés » (cf. plus tard)
- ▶ Les AS hébergent (au sens routage) des réseaux
  - Les réseaux à l'intérieur des AS sont identifiés par leur plage contiguë d'adresses
- ▶ Le Routage à l'intérieur d'un AS est cohérent:
  - Utilise typiquement le même protocole de routage
  - Un AS est Indépendant des autres AS concernant son routage interne

Algorithmique de routage Isma 2010-2011

DAE

---

---

---

---

---

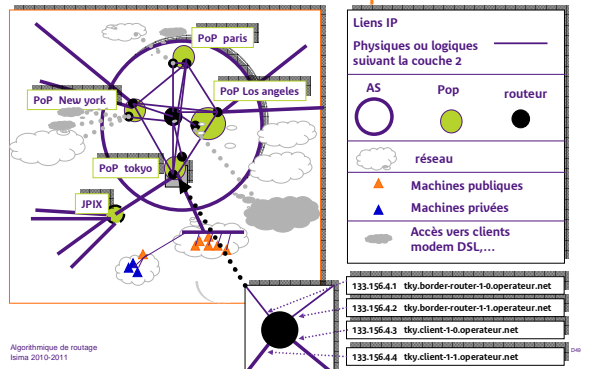
---

---

---



## 2.2 l'AS d'un ISP schématiquement




---

---

---

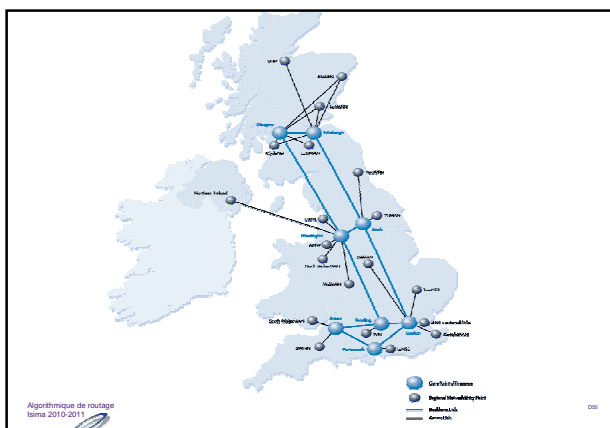
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

## 2. Le routage IP et L'Internet

- 2.1 Les communications IP et le routage en général
- 2.2 l'Internet, les réseaux, les AS
- 2.3 Le routage IP dans l'Internet: statique/dynamique, intra/inter AS**
- 2.4 Les plus courts chemins dans les graphes
- 2.5 différents types de protocoles de routage
- 2.6 Le routage Internet de 1980 à 2005

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.3 Le routage IP

### ▶ La problématique

- Comment choisir la meilleure route?
  - Maintenir les informations concernant les différentes routes
  - Comparer les routes: d'après des métriques, l'état des liens et des routeurs

### ▶ Un routage Internet devrait **idéalement** répondre à toutes sortes de critères

- Minimiser le trafic des messages protocolaires, l'utilisation CPU des routeurs
- Pas de cycles, pas d'oscillations
- Minimiser le temps de convergence
- Gérer la dynamique de la topologie, de l'état des liens et des routeurs
- Respecter les politiques de routage de chaque opérateurs
- Prendre en compte la charge des liens
- Minimiser le délai
- Minimiser le nombre de bonds
- Prendre en compte la QoS (types de trafics)
- Maximiser la sécurité
- Passer à l'échelle (« scalability »)

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.3 Statique VS. Dynamique

### ▶ Routage statique

- Fastidieux et risque d'erreur important si taille > 10
  - Convient uniquement aux réseaux de taille modeste et/ou homogènes
- Cas triviaux
  - Une route par défaut vers FAI ou routeur le plus proche
  - les stations (ne font pas de routage)
- Pas gestion des routes redondantes
- Les mise à jour sont manuelles et la configuration peut est souvent modifiée après:
  - Le constat d'une erreur (un lien ou une machine en panne, un erreur de configuration)
  - Un changement de topologie

### ▶ Routage dynamique

- S'adapte à la vie et la mort des routeurs et des liaisons
- Configuration simplifiée
- Prise en compte de l'hétérogénéité des routeurs
  - Un même protocole est implémenté par plusieurs constructeurs et sur plusieurs plate-formes

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.3 Routage intra/inter domaine

### ▶ Le routage intra-domaine (intra-AS)

- À l'intérieur d'un même domaine
  - **Granularité routeur**
  - Taille raisonnable du nombre de routeurs et de liens
  - Les routeurs peuvent se permettre de calculer les routes d'après la carte du réseau, l'état des liens et les métriques
- Sous la même autorité administrative
  - Responsabilité des ressources
  - Connaissance globale du réseau
  - Configuration concertée des équipements
- Les protocoles courants:
  - Protocoles à vecteur de distance: RIP, IRGP
  - Protocoles à état de liens: IS-IS, OSPF

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.3 Routage intra/inter domaine (2)

### ► Le routage inter-domaine (inter-AS)

- Entre tous les AS
  - Granularité AS
- Chaque AS est géré de façon indépendante mais le routage doit se mettre en place entre la totalité des AS de l'Internet
- Chaque AS est connecté à un ou plusieurs AS en un ou plusieurs PoP, par l'intermédiaire de points d'interconnexion (IX, NAP,...), ou par liaison privée
- Les AS établissent des contrats d'interconnexion et mettent en place des politiques de routage
  - Il n'est pas possible de suivre n'importe quelle route même si elle existe

---

---

---

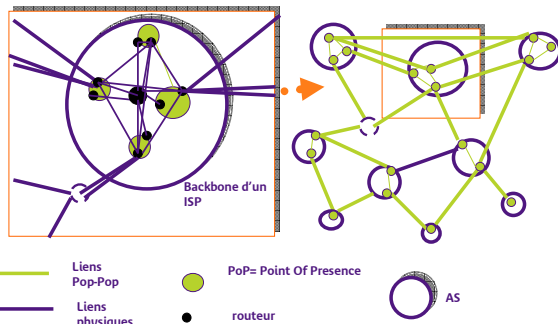
---

---

---

---

## 2.3 Connectivités inter-AS: PoP et routeurs



---

---

---

---

---

---

---

## 2.3 routage intra/inter

### ► Certains routeurs sont multi-protocole

- Ils jouent un rôle dans le routage intra domaine et dans le routage inter domaine

### ► Les informations concernant les routes d'AS seront échangées entre les routeurs d'un même domaine et entre les routeurs de domaines interconnectés.

- Le routage entre AS est contraint par les politiques de routage mises en places dans les routeurs (cf. partie sur BGP)

### ► Les informations concernant les routes à l'intérieur d'un AS ne seront pas propagées à l'extérieur de l'AS

---

---

---

---

---

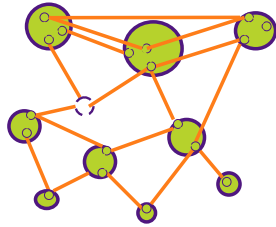
---

---

## 2.3 protocoles Intra/inter domaine

IGP : « Interior Gateway Protocol »

EGP : « Exterior Gateway Protocol »



---

---

---

---

---

---

---

## 2.3 le routage Internet

### ▶ Algorithmes de routage:

- ▶ Statique (changements peu fréquents et/ou petite taille)
- ▶ Dynamiques (les chemins sont mis à jour au cours du temps)

### ▶ Le routage Internet global résulte de la coordination:

- ▶ Du routage inter-domaine
- ▶ Du routage intra-domaine
- ▶ Du routage statique mis en place dans les « extrémités de l'Internet »

### ▶ Le routage Internet est hiérarchique

- ▶ Hiérarchie inter/intra domaine
- ▶ Hiérarchie des Opérateurs
  - Tiers 1, Tiers 2, Content Providers

---

---

---

---

---

---

---

## 2. Le routage IP et L'Internet

- 2.1 Les communications IP et le routage en général
- 2.2 L'Internet, les réseaux, les AS
- 2.3 Le routage IP dans l'Internet: statique/dynamique, intra/inter AS
- 2.4 Les plus courts chemins dans les graphes
- 2.5 différents types de protocoles de routage
- 2.6 Le routage Internet de 1980 à 2005

---

---

---

---

---

---

---

## 2.4 un peu de théorie des graphes

### Un graphe $G = (V, E)$

- $V$  un ensemble de nœuds
- $E$  un ensemble de liens
  - Si graphe orienté, les liens sont appelés arcs
  - Sinon les liens sont appelés arêtes et sont non orienté
- $(u, v) = (v, u)$

### Métriques de liens

- Application  $w: V \times V \rightarrow \{1, +\infty\}$ 

$$(u, v) \mapsto w_{u,v} \begin{cases} = \infty & \text{si le lien } (u, v) \text{ n'existe pas} \\ = \text{poids de l'arc } (u, v) & \text{sinon} \end{cases}$$

### Exemple

- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$



## 2.4 un peu de théorie des graphes (2)

### Plus courts chemins d'un nœud $i$ vers un nœud $j$

- Equation d'optimalité (condition de sous optimalité des chemins de Bellman)

-  $X_i$  = valeur plus court chemin d'un nœud 1 vers un autre nœud  $j$

$X_k$  est dans  $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$

$\oplus = (+)$

$\ominus = (\text{Minimum})$

$\oplus \infty = \infty$

$\ominus 0 = 0$

$$\begin{cases} x_1 = \left( \bigoplus_{j=1}^n x_j \otimes w_{j1} \right) \ominus e, \\ x_i = \left( \bigoplus_{j=1}^n x_j \otimes w_{ji} \right) \ominus e. \end{cases}$$

### Si un chemin $C$ du nœud 1 au nœud $i$ est le plus court chemin de valeur $x_i$ ,

- Alors quelque soit le nœud du graphe  $j$  voisin de  $i$ .

- Le chemin  $C' = (1 \rightarrow \dots \rightarrow j \rightarrow i)$  a un coût  $x_j + C(j, i) \geq x_i$

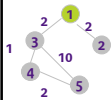
## 2.4 un peu de théorie des graphes (3)

### Matrice d'adjacence, Plus courts chemins d'un nœud $i$ vers un nœud $j$

- Les opérateurs entre éléments de distance  $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ , sont

$\oplus = (+)$

$\ominus = (\text{Minimum})$



$\oplus \infty = \infty$   
 $\ominus 0 = 0$

$$A = \begin{pmatrix} \infty & 2 & 2 & \infty & \infty \\ 2 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 2 & \infty & \infty & 1 & 2 \\ \infty & \infty & 1 & \infty & 2 \\ \infty & \infty & 10 & 2 & \infty \end{pmatrix}$$

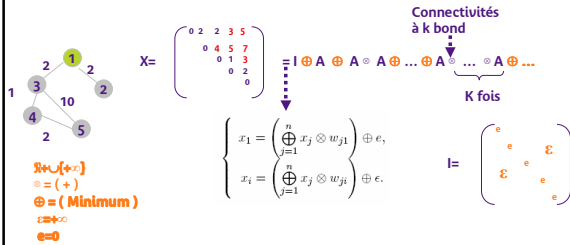
Connectivités à 1  
bond

$$A \oplus A = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 2 & 3 & 12 \\ 2 & 4 & 4 & \infty & \infty \\ 2 & 4 & 2 & 1 & 3 \\ 3 & \infty & 1 & 2 & 2 \\ 12 & \infty & 3 & 2 & 4 \end{pmatrix}$$

Connectivités à 2  
bond

## 2.5 un peu de théorie des graphes (4)

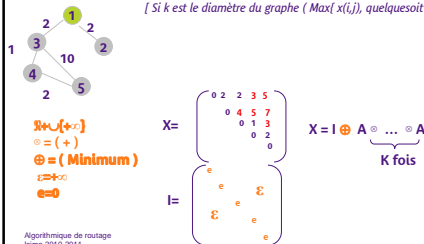
### Equation d'optimalité



## 2.5 un peu de théorie des graphes (5)

### N'ayez pas peur !

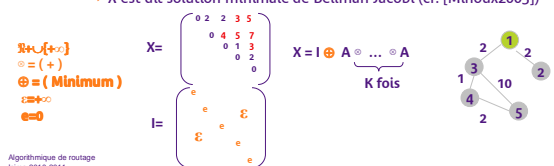
- avec des métriques positives
- la convergence est assurée pour la suite de matrices
- Matrice  $K$ -nilpotente
- [ Si  $k$  est le diamètre du graphe ( $\text{Max}\{x(i,j), \text{quelquesoit } i \text{ et } j\}$ ) ]



## 2.5 Les plus courts chemins dans les graphes c'est de l'algèbre linéaire!

### Les algorithmes de calcul plus court chemin existant, ont leur analogie en algèbre linéaire

- Calcul de la pseudo inverse généralisée de la matrice d'adjacence du graphe
- Ici l'espace des valeurs de chemins est le dioïde  $(\mathbb{R} \cup \{+\infty\}, \text{Min}, +)$ 
  - Un dioïde est un semi anneau spécial
- $X$  est dit solution minimale de Bellman-Jacobi (cf. [Minoux2003])



## 2.5 Les plus courts chemins dans les graphes c'est de l'algèbre linéaire! (2)

### ▶ Dans le cas des réseaux

- Graphe connexe (pour le routage, la connexité c'est un minimum!)
- Les poids associés aux arcs sont positifs ou nuls
- Les couts des chemins sont bornés et l'∞ n'est qu'une simple borne supérieur

### ▶ L'Algorithme de Jacobi généralisé

- Complexité en  $O(KM)$ , M le nombre d'éléments non nuls de A
- Algorithme de Bellman (1958)

### ▶ L'Algorithme de Gauss Seidel généralisé

- Algorithme de Ford (196)

### ▶ L'algorithme glouton

- Si le diode est sélectif  $e \oplus a = e$  (e est l'élément neutre de  $\oplus$ )
  - La matrice peut être déterminé ligne par ligne
- Algorithme de Dijkstra !!
- Complexité  $O(n^2)$  opérations  $\oplus$  et  $O(n^2)$  opérations  $\otimes$

## 2. Le routage IP et L'Internet

- 2.1 Les communications IP et le routage en général
- 2.2 L'Internet, les réseaux, les AS
- 2.3 Le routage IP dans l'Internet: statique/dynamique, intra/inter AS
- 2.4 Les plus courts chemins dans les graphes
- 2.5 différents types de protocoles de routage**
- 2.6 Le routage Internet de 1980 à 2005

## 2.4 différents types de protocoles de routage

### ▶ Les changements de topologie (panne, ajout) et de métrique de liens doivent être pris en compte dynamiquement

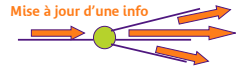
- Le but est la convergence (pas d'oscillation)
- Calcul optimal de routes (et pas de cycles svp!)

### ▶ Les protocoles de routage

- A vecteur de distance
  - Intra domaine: RIP, IRGP
- A état des liens
  - Intra domaine: IS-IS, OSPF
- A vecteur de chemin
  - Inter domaine: BGP

## 2.5 protocoles à vecteur de distance

- ▶ **Itératif** (continue à échanger les informations tant que possible)
  - ▶ Inondation de messages



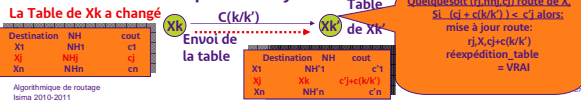
- ▶ **Asynchrone**

▶ les décisions des routeurs sont indépendantes

- ▶ **Distribué**

▶ les routeurs ne disposent pas de la vision complète du réseau

- ▶ **Diffusion des tables de routages locales avec coût des liaisons à chaque mise à jour**



## 2.5 protocoles à vecteur de distance

- ▶ **les routeurs diffusent périodiquement leur table**

⊕ si pas de changement après un temps T

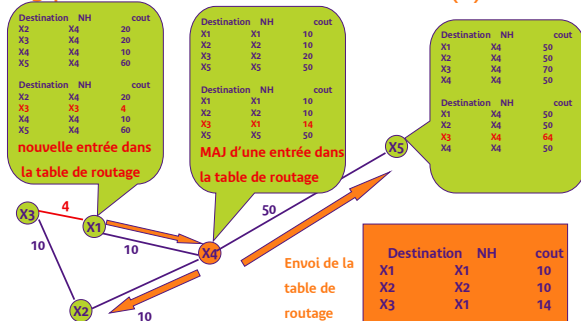
- ▶ **Une route:**

▶ Une adresse destination  
 ▶ Une adresse de passerelle (next hop)  
 ▶ Un métrique indiquant le nombre de sauts nécessaires pour atteindre la destination (c'est une estimation)

- ▶ **Un route est ajoutée dans la table si:**

▶ La destination était inconnue par le routeur  
 ▶ La nouvelle route reçue pour une destination d a un poids w tel que:  
 $(\oplus W' \text{ est le poids de la route présente dans le routeur})$   
 -  $W + 1 < W'$  (la route est meilleure!)

## 2.5 protocoles à vecteur de distance (2)





## 2.5 protocoles à vecteur de distance (3)

- ▶ N le nombre de nœuds du réseau
- ▶ Chaque nœud  $i$  a une estimation du coût de

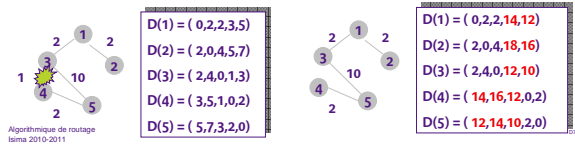
La route vers  $j \neq i$

$$D(i) = (C(i,1), \dots, C(i,j), \dots, C(i,n))$$

Vecteur de distance

- ▶ Les nœuds n'ont pas besoin de la topologie complète

▶ Juste la distance estimée vers toutes les destinations connues

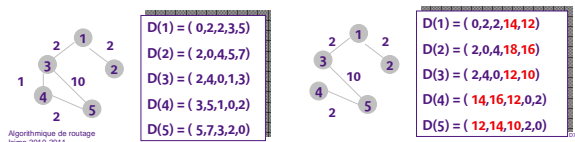


## 2.5 protocoles à vecteur de distance (4)

- ▶ Après un message de  $X_i$ , le nœud  $X_j$  effectue l'opération

$$D(X_j, d) = \min \{ D(X_i, d), D(X_j, d) + d(X_i, X_j) \}$$

- ▶ C'est un calcul distribué des plus courts chemins avec l'Algorithme de Bellman Ford



## 2.5 le routage à états de liens est une méthode de calcul asynchrone de type Bellman-Ford

- ▶ A chaque traitement d'une table envoyée par un nœud  $X_i$  par le nœud  $X_j$  (adjacent à  $X_j$ ),

- ▶ On appelle  $X(k,l)$  la valeur du plus court chemin de  $k$  vers  $l$
- ▶ On appelle  $w$  le poids entre  $X_i$  et  $X_j$

- ▶ Pour chaque destination  $k$ , mise à jour de la route vers  $k$ 
  - $X(j,k) = \min \{ X(i,k), X(i,k) + w \}$
- ▶ Le calcul est en fait une itération de l'algorithme de Jacobi pour le calcul de la ligne  $j$  de  $X$

- ▶ Si les mises à jours ne sont pas trop fréquentes

- ▶ Convergence, mais lente

## 2.5 protocoles à vecteur de chemin

- ▶ Les routeurs s'échangent des chemins complets avec leurs attributs
- ▶ Seuls les meilleurs chemins sont échangés
- ▶ Les routeurs modifient le chemin et ses attributs en propageant le message protocolaire correspondant
- ▶ Voir BGP...

## 2.5 protocoles à état des liens

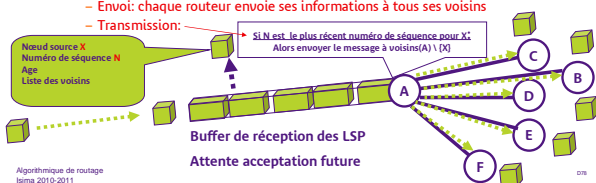
- ▶ « Link State Routing »
  - ▶ Les liens ont une métrique et un état qui leur est associé
  - ▶ Les routeurs émettent des messages lorsque l'état de liens évolue Ou périodiquement
- ▶ La topologie, l'état et le coût des liaisons sont propagés entre tous les nœuds (pas seulement aux voisins)
  - ▶ Flooding de paquets d'état (« Link state packet » LSP)
  - ▶ Les routeurs disposent de la vision globale du réseau
  - ▶ Chaque routeur calcule les routes vers tous les nœuds du réseau de façon optimale (cf. métriques) avec un algorithme de plus court chemin (comme celui de *dijkstra* par exemple)

## 2.5 protocoles à état des liens (2)

- ▶ Chaque routeur met à jour sa table de routage d'après les chemins qu'il a calculé en fonction des informations échangées par messages protocolaires

### ▶ Paquets LSP

- ▶ Échangés et transmis entre voisins pour simuler l'envoi N->N
  - Envoi: chaque routeur envoie ses informations à tous ses voisins
  - Transmission:



## 2.5 protocoles à état des liens (3)

- ▶ L'age des LSP commence à 7, à chaque routeur, il est décrémenté toutes les 8 secondes
- ▶ La propagation des LSP fonctionne tant que les numéros de séquence ne se s'intercalent pas
- ▶ Quelques remarques:
  - Que se passe t'il lorsque:
    - Temps de transmission et de traitement variables des LSP
    - Les numéros de séquence sont réinitialisés
    - Détection de pannes, Sécurité, ...
  - Beaucoup de lignes de code...!

---

---

---

---

---

---

---

## 2.5 Comparaisons des protocoles intra-domaine

- ▶ **Protocoles DV (« distance vector »)**
  - Connait seulement ses voisins
  - Communication des tables entre voisins seulement
    - Les update sont grosses
  - Convergence lente
  - Utilisation CPU faible
- ▶ **Protocoles LS (« link state »)**
  - Connait tout le réseau
  - Inondation des messages
    - Petites update partout
  - Convergence plus rapide que DV: Moins de cycles
  - Forte utilisation CPU : Plus chères que DV

---

---

---

---

---

---

---

## 2.5 Remarques sur les cycles

- ▶ **Route par défaut et alimentation manuelles**
  - L'administrateur doit connaître la topologie et ne pas faire d'erreurs de saisie
- ▶ **Protocoles LS**
  - Les routeurs disposent de l'état du réseau en entier
    - Les routeurs calculent eux-mêmes leur meilleure route sans cycles!
- ▶ **Protocoles VD**
  - Les oscillations ne sont pas censées intervenir sauf pendant la convergence
    - Preuve: tout circuit a un coût strictement positif
- ▶ **Protocoles VC**
  - Les chemins sont échangés
    - Pas de cycles en règle générale

---

---

---

---

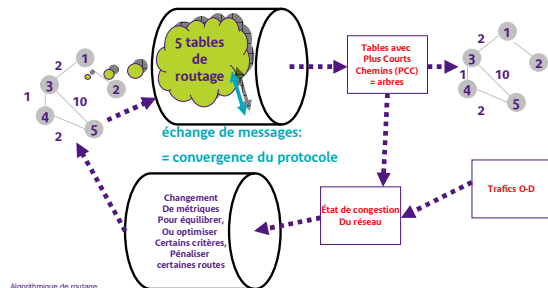
---

---

---

## 2.5 Prise en compte de l'état du réseau

➤ Sans considérer les changements de topologie et pannes



Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

002

## 2.5 Prise en compte de l'état du réseau + pannes + mises à jour : attention au oscillations

➤ dans le cas de convergence lente

- Changer les métriques très rarement
- Choisir les métriques compatibles pour le réseau mais pas optimales une bonne fois pour toute !
  - en inter domaine c'est le cas (le déploiement est fastidieux)
- Utiliser des techniques de changements de métriques automatiques (existe en intra domaine seulement)
  - Contrôle et Minutage des mises à jour

➤ Pénaliser les mises à jour trop fréquentes dues au messages échangés

–Route dampening (cf. chapitre inter domaine)

➤ Les oscillations peuvent aussi être dues à la configuration

- incompatible de la topologie (cf. chapitre inter domaine)
- politiques de routage incompatible (cf. chapitre inter domaine)

Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

003

## 2. Le routage IP et L'Internet

- 2.1 Les communications IP et le routage en général
- 2.2 L'Internet, les réseaux, les AS
- 2.3 Le routage IP dans l'Internet: statique/dynamique, intra/inter AS
- 2.4 différents types de protocoles de routage
- 2.4 Les plus courts chemins dans les graphes
- 2.5 différents types de protocoles de routage
- 2.6 Le routage Internet de 1980 à 2005

Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

004

## 2.6 l'Internet il y a 25 ans

- ▶ **1969: réseau de la défense américaine**
  - On remarque que la commutation de circuit n'est pas optimale en terme de sécurité
    - On pense à un réseau « web » de datagrammes appelée catenet
    - DARPA Internet Program
- ▶ **1970 – 1980 : recherches (défense + académique)**
  - TPC/IP ont été développé et adopté par ARPANET en 1983
- ▶ **Mids 1980**
  - Arrivée de RIP
  - L'ARPANET est le réseau!
  - En 1983: 562 hôtes référencés
  - 1985: LAN, subnetting (RFC 950)
  - 1986: National Science Foundation (NSF)
    - Supercomputer Center Program

Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

001

---

---

---

---

---

---

---

## 2.6 l'Internet il y a 25 ans

- ▶ **1985: NFSNET**
  - 5 machines conséquentes disponibles pour de nombreux utilisateurs
  - Le réseau de backbone américain est né (Link State Routing)
  - Il sera privatisé en 1995
- ▶ **1987**
  - Domain naming stable (rfc 1034)
  - Le premier « vers internet »!
- ▶ **Fin 1980's**
  - Amélioration de TCP
  - (Standardisation de RIP)
- ▶ **Début 1990's**
  - La première pénurie d'adresses: CIDR arrive
  - L'IETF commence à regarder IPv6
  - L'hypertexte se met en place (CERN + NCSA)
    - Un œil publique sur Internet va pouvoir seplacer

Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

001

---

---

---

---

---

---

---

## 2.6 l'Internet il y a 25 ans

- ▶ **Milieu 1990's**
  - Progrès sociologiques (Internet fait partie du vocabulaire commun)
  - Intéressement des entreprises (community business)
    - Explosion des Service Providers
    - Consulting, livres , émissions TV
  - Naissance du mouvement « Free Software »
  - Mécanismes de distribution
    - Nombreux FTP, newsgroup, mailing list
  - EMACS et LINUX
  - ...

Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

001

---

---

---

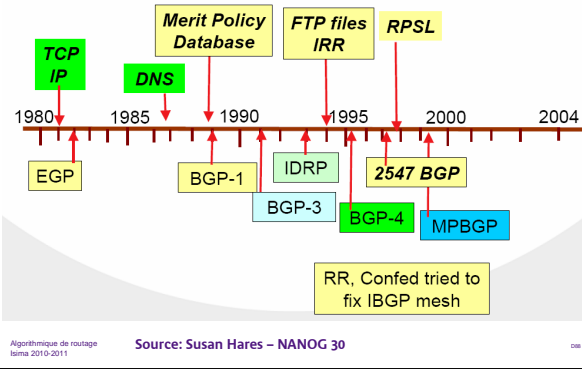
---

---

---

---

## 2.6 15 années de routage avec politiques




---

---

---

---

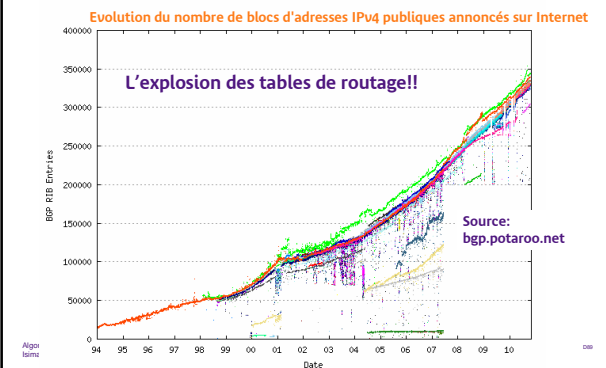
---

---

---

---

## 2.6 l'Internet maintenant...




---

---

---

---

---

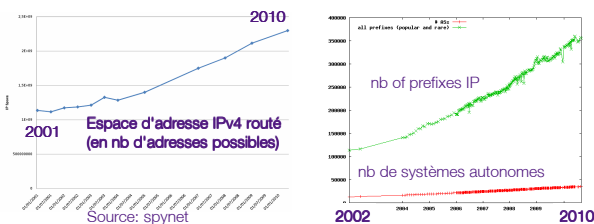
---

---

---

## En 2010, l'Internet est toujours en pleine expansion...

Il en va de même pour le trafic IP...




---

---

---

---

---

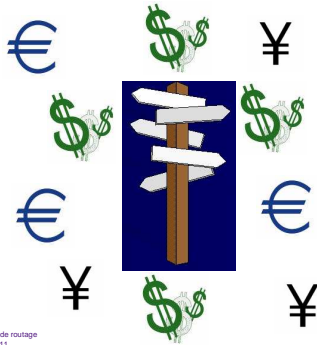
---

---

---

## L'Internet maintenant

'Radical rethinking' of Internet routing under way



Algorithmique de routage  
Isma 2010-2011

"We've got around two years left of IPv4 address distribution as we knew it, and then that particular world comes to an end. So what should we be doing now? "

"To expect anything deployed in the near future would be unlikely," Huston says. "This is quite deep research, and it's going to take quite a long time."

Geoff Huston, 2007

"We don't know if there's a successful workable solution, [...] Until we discover one, it's an open-ended process."

Lixia Zhang, 2007 <sup>on</sup>

---

---

---

---

---

---

---

---