Protocoles de routage

Architecture matérielle, systèmes d'exploitation et réseaux

① Rappels de première : réseaux et adressage

1.1 Adressage IP et masque de sous-réseau

Une adresse IPv4 est un identifiant numérique attribué à chaque interface réseau d'une machine. Elle est codée sur 32 bits et notée sous la forme de quatre octets séparés par des points, par exemple `192.168.1.42`.

À chaque adresse IP est associé un **masque de sous-réseau** qui permet de distinguer la partie *réseau* (commune à toutes les machines du même réseau local) de la partie *hôte* (propre à chaque machine). Par exemple, avec le masque `255.255.255.0`, les 24 premiers bits identifient le réseau. On utilise la notation CIDR : `192.168.1.0/24`.

Définition 1 **(Adresse réseau)** L'adresse réseau s'obtient par un ET logique bit à bit entre l'adresse IP d'une machine et son masque de sous-réseau. Deux machines appartiennent au même réseau local si et seulement si elles partagent la même adresse réseau.

Exemple 1 (Calcul d'adresse réseau). Soit la machine d'adresse `172.16.5.130/16`.
Le masque `/16` correspond à `255.255.0.0`. L'adresse réseau est donc `172.16.0.0/16`. Toute machine dont l'adresse commence par `172.16.x.x` (avec le même masque) appartient au même réseau local.

1.2 Le modèle TCP/IP et l'encapsulation

Le modèle TCP/IP organise les communications réseau en quatre couches :

1. **couche accès réseau** (liaison) : gère la transmission physique des données sur le support (Ethernet, Wi-Fi) et utilise les adresses MAC ;
2. **couche internet** : assure le routage des paquets entre réseaux grâce au protocole IP et aux adresses IP ;
3. **couche transport** : garantit (TCP) ou non (UDP) la fiabilité de la communication de bout en bout ;
4. **couche application** : regroupe les protocoles utilisés directement par les logiciels (HTTP, DNS, SMTP, etc.).

Définition 2 **(Encapsulation)** Lors de l'envoi de données, chaque couche ajoute un en-tête contenant les informations nécessaires à son fonctionnement. On parle d'**encapsulation**. À la réception, chaque couche retire l'en-tête qui lui correspond : c'est la **désencapsulation**.

Application	Transport	Internet	Accès réseau
Données	Segment (TCP) / Datagramme (UDP)	Paquet IP	Trame Ethernet

1.3 Routeurs et switchs

Un **switch** (commutateur) relie les machines d'un même réseau local en utilisant les adresses MAC. Un **routeur** interconnecte plusieurs réseaux locaux en s'appuyant sur les adresses IP. Internet résulte de l'interconnexion de réseaux par des routeurs.

Un routeur possède plusieurs interfaces réseau, chacune connectée à un réseau différent. Chaque interface a sa propre adresse IP et sa propre adresse MAC.

② Tables de routage

2.1 Principe

Lorsqu'un routeur reçoit un paquet, il consulte sa **table de routage** pour déterminer vers quelle interface (et éventuellement quel routeur voisin) transmettre le paquet afin qu'il se rapproche de sa destination.

Définition 3 **(Table de routage)** Une table de routage est un tableau associant à chaque réseau de destination connu les informations suivantes : l'adresse du réseau de destination, le moyen de l'atteindre (interface de sortie ou adresse du routeur suivant, appelé *passerelle* ou *gateway*), et une **métrique** mesurant le coût de la route.

Une table réelle comporte aussi une **route par défaut**, `0.0.0.0/0` (notée *default*), qui capte toute destination absente de la table, et une colonne **interface de sortie** ; la règle appliquée est celle du préfixe le plus long.

2.2 Exemple

Considérons le réseau suivant avec deux routeurs A et G :

— le routeur A possède trois interfaces : `eth0` (`172.16.255.254/16`), `eth1` (`192.168.7.1/24`) et `eth2` (`172.17.255.254/16`) ;

— le routeur G possède deux interfaces : `eth0` (`10.255.255.254/8`) et `eth1` (`192.168.7.2/24`).

Table de routage simplifiée du routeur A :

Réseau	Moyen de l'atteindre	Métrique
`172.16.0.0/16`	`eth0`	0
`192.168.7.0/24`	`eth1`	0
`172.17.0.0/16`	`eth2`	0
`10.0.0.0/8`	`192.168.7.2` (routeur G)	1

Les réseaux directement connectés ont une métrique de 0. Le réseau `10.0.0.0/8` n'est pas directement relié au routeur A, mais celui-ci sait qu'il faut transmettre les paquets au routeur G pour l'atteindre (métrique de 1).

Exercice 1 *Table de routage du routeur G* En vous inspirant de la table de routage du routeur A ci-dessus, déterminez la table de routage du routeur G.

2.3 Routage statique et routage dynamique

Il existe deux manières de remplir une table de routage :

— le **routage statique** : l'administrateur configure manuellement chaque entrée. C'est simple mais inadapté aux grands réseaux et incapable de s'adapter aux pannes ;

— le **routage dynamique** : des protocoles permettent aux routeurs d'échanger automatiquement des informations et de mettre à jour leurs tables. C'est la méthode utilisée sur Internet.

③ Le protocole RIP

3.1 Principe

Le protocole **RIP** (*Routing Information Protocol*) est un protocole de routage **à vecteur de distances**. Sa métrique est le **nombre de sauts** (*hops*), c'est-à-dire le nombre de routeurs à traverser pour atteindre le réseau de destination.

Définition 4 **(Vecteur de distance)** Un vecteur de distance est un couple (destination, distance). Chaque routeur maintient un tableau de ces vecteurs constituant sa table de routage.

3.2 Fonctionnement

1. **initialisation** : chaque routeur connaît uniquement les réseaux directement connectés à ses interfaces (distance 0) ;
2. **échange périodique** : toutes les 30 secondes, chaque routeur envoie sa table de routage complète à ses voisins directs. Chaque route est surveillée par un **temporisateur** : si aucune annonce ne la confirme pendant 180 secondes (six échanges manqués), elle est déclarée invalide (distance 16) puis retirée de la table ;
3. **mise à jour** : à la réception d'une table voisine, un routeur applique les règles suivantes :
   — si un réseau inconnu apparaît, il l'ajoute à sa table (distance reçue + 1) ;
   — si un chemin plus court est découvert vers un réseau connu, il met à jour l'entrée ;
   — si un chemin plus long est reçu du même routeur voisin déjà enregistré, il met à jour (la topologie a changé) ;
   — sinon, il ignore l'information.
4. **convergence** : après plusieurs cycles d'échanges, toutes les tables se stabilisent.

L'algorithme sous-jacent est l'algorithme de **Bellman-Ford**.

3.3 Limites de RIP

— la distance maximale est de **15 sauts** (16 signifie « inaccessible ») ;

— l'envoi périodique des tables complètes génère un trafic réseau important ;

— la convergence peut être lente sur de grands réseaux ;

— RIP ne tient pas compte de la qualité des liaisons (débit, latence).

Remarque 1 (Routing by rumor). Avec RIP, chaque routeur ne connaît que ses voisins directs et construit sa vision du réseau de proche en proche, par « rumeur ». Il n'a jamais de vision globale du réseau.

3.4 Exemple détaillé

Considérons un réseau avec trois routeurs A, B et C reliés ainsi :

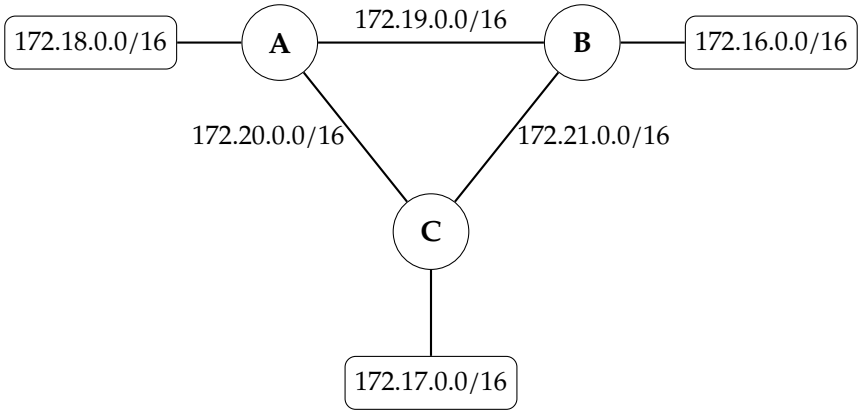


Table de routage du routeur A avec RIP (après convergence) :

Réseau	Passerelle	Distance (sauts)
`172.18.0.0/16`	directe	0
`172.19.0.0/16`	directe	0
`172.20.0.0/16`	directe	0
`172.16.0.0/16`	via B	1
`172.21.0.0/16`	via B	1
`172.17.0.0/16`	via C	1

Exercice 2 *Table de routage RIP* Soit le réseau représenté dans le schéma ci-dessus.

1. Déterminez la table de routage du routeur B avec le protocole RIP.
2. Quel chemin est emprunté par un paquet allant de `172.18.1.1` vers `172.16.5.3` ?
3. Si la liaison directe entre A et B tombe en panne, quel nouveau chemin serait emprunté ?

④ Le protocole OSPF

4.1 Principe

Le protocole **OSPF** (*Open Shortest Path First*) est un protocole de routage **à état de liens**. Contrairement à RIP, chaque routeur possède une **vision globale** du réseau et calcule les chemins optimaux en tenant compte du **débit** des liaisons.

Définition 5 **(Coût d'une liaison (OSPF))** Le coût d'une liaison est défini par la formule :

$$\text{coût} = \frac{10^8}{\text{débit en bit/s}}$$

Plus le débit est élevé, plus le coût est faible, et donc plus la liaison est avantageuse. Le coût total d'une route est la somme des coûts de chaque liaison traversée.

Exemple 2 (Calcul de coûts).

Type de liaison	Débit	Coût
Ethernet	10 Mbit/s	$\frac{10^8}{10^7} = 10$
Fast Ethernet	100 Mbit/s	$\frac{10^8}{10^8} = 1$
Gigabit Ethernet	1 Gbit/s	$\frac{10^8}{10^9} = 0{,}1$

4.2 Fonctionnement

1. **découverte des voisins** : chaque routeur envoie des messages *hello* à ses voisins pour identifier les routeurs adjacents et le débit de chaque liaison. Ces messages sont envoyés toutes les 10 secondes ; un voisin silencieux pendant 40 secondes est déclaré injoignable et les routes sont recalculées ;
2. **diffusion de l'état des liens** : chaque routeur envoie sa table de voisinage à *tous* les routeurs du réseau (pas seulement aux voisins). Ainsi, chaque routeur dispose d'une carte complète du réseau ;
3. **calcul des routes** : chaque routeur applique l'algorithme de **Dijkstra** sur le graphe pondéré du réseau pour déterminer les chemins de coût minimal vers chaque destination.

Propriété 1 **(Comparaison avec RIP)** OSPF se distingue de RIP sur trois points fondamentaux :

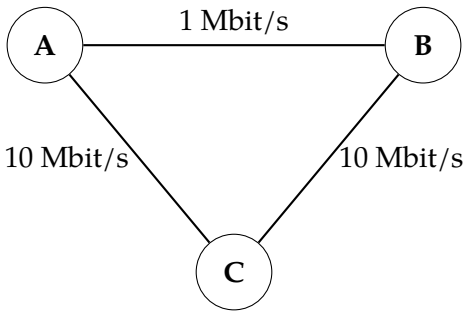
— chaque routeur possède une **vision globale** du réseau (et non locale) ;

— la métrique est le **coût basé sur le débit** (et non le nombre de sauts) ;

— les mises à jour ne sont envoyées que lorsqu'un changement intervient (et non périodiquement toutes les 30 secondes).

4.3 Exemple détaillé

Reprenons le réseau à trois routeurs A, B et C avec les débits suivants :



Calcul des coûts :

Liaison	Débit	Coût
A — B	1 Mbit/s	$\frac{10^8}{10^6} = 100$
A — C	10 Mbit/s	$\frac{10^8}{10^7} = 10$
B — C	10 Mbit/s	$\frac{10^8}{10^7} = 10$

Pour aller de A à B :

— chemin direct A → B : coût de 100 ;

— chemin A → C → B : coût de 10 + 10, soit 20.

OSPF choisit le chemin A → C → B (coût 20), bien qu'il comporte un saut supplémentaire. RIP aurait choisi le chemin direct A → B (1 seul saut) alors que son coût est cinq fois plus élevé (100 contre 20).

Exercice 3 *Comparaison RIP et OSPF* Soit le réseau ci-dessus avec les débits indiqués.

1. Déterminez la table de routage du routeur A avec le protocole RIP.
2. Déterminez la table de routage du routeur A avec le protocole OSPF.
3. Quel chemin choisit chaque protocole pour acheminer un paquet du réseau de A vers le réseau de B ? Justifiez.
4. Dans quelle situation RIP pourrait-il donner un meilleur résultat qu'OSPF ?

5 Synthèse : RIP vs OSPF

Critère	RIP	OSPF
Métrique	Nombre de sauts	Coût (basé sur le débit)
Vision du réseau	Locale (voisins uniquement)	Globale (tout le réseau)
Algorithme	Bellman-Ford	Dijkstra
Mises à jour	Périodiques (30 s)	Sur changement uniquement
Limite	15 sauts maximum	Pas de limite de sauts
Trafic généré	Important	Modéré
Réseaux adaptés	Petits réseaux	Moyens à grands réseaux

Exercice 4 *Synthèse*

1. Expliquez pourquoi le protocole RIP n'est pas adapté aux grands réseaux comme Internet.
2. Un réseau utilise des liaisons exclusivement à 100 Mbit/s. Les deux protocoles donneraient-ils les mêmes routes ? Justifiez.
3. Expliquez en quoi la modélisation d'un réseau par un graphe pondéré est pertinente pour le protocole OSPF.