

Chapitre 9 - Protocoles de routage

I - Introduction

Un réseau informatique permet de relier les différentes machines afin qu'elles puissent communiquer. Un message échangé entre deux machines est découpée en paquets, et chacun de ces paquets transite indépendamment des autres sur le réseau de la machine émettrice à la machine destinataire qui reconstitue le message à partir des différents paquets.

Un réseau est en réalité un ensemble de sous-réseaux interconnectés par des machines particulières appelées **routeurs**. Les interconnexions peuvent être de natures diverses : Ethernet, Wi-Fi, fibre optique, câble téléphonique, liaison par satellite, etc.



Un routeur CISCO

Crédits : Cisco Systems, [CC BY-SA 3.0](#), via [Wikimedia Commons](#)

II - Définitions

Définition 1

- Un **switch** (ou une passerelle) est un équipement réseau permettant de faire le lien entre un **réseau local** et un autre réseau (très souvent le réseau Internet), constitué d'un ensemble de routeurs.
- Un switch possède 2 adresses IP : une adresse IP dans le réseau local, et une adresse IP dans le réseau Internet.

Exemple : la box internet de votre maison est un switch permettant de faire le lien entre le réseau local de votre maison et le réseau Internet.

Définition 2

- Un **routeur** est équipement réseau permettant d'acheminer les données d'un point à un autre du réseau.
- Un routeur est composé d'au moins 2 **interfaces réseau** (cartes réseau).
- Les routeurs les plus simples permettent de relier ensemble deux réseaux (ils possèdent alors 2 interfaces réseau), mais il existe des routeurs capables de relier ensemble une dizaine de réseaux.
- Chaque interface réseau est associée à un sous-réseau représenté par une adresse IP de ce sous-réseau et un masque de sous-réseau.
- Chaque interface réseau possède une adresse IP dans le sous-réseau qu'elle permet de relier. Un routeur possède donc au moins deux adresses IP.

Définition 3

- Une **adresse IP** permet d'identifier un équipement réseau, une machine, un smartphone ... dans un sous-réseau.
- Une adresse IP **version 4 (IPv4)** est composée de 4 nombres décimaux séparés par des points. Chaque nombre est appelé un octet et peut aller de 0 à 255. Exemples d'adresse IP V4 : 192.168.1.1 ; 167.234.17.89.
- Une adresse IP **version 6 (IPv6)** est codée sur 128 bits soit 16 octets. Cela permet de résoudre le problème de pénurie d'adresses IP avec un nombre gigantesque de 2^{128} adresses disponibles. Toutes les machines du réseau pourront recevoir une adresse IP unique routable sur Internet. La mise en place d'IPv6 est cependant progressive car il faut mettre à jour des millions de machines.

Définition 4

Un **masque de sous-réseau** permet d'identifier un sous-réseau.

En IPv4, le masque de sous-réseau est composé de 32 bits (4 octets) séparés en deux parties :

- Une partie sur N bits identifiant le réseau spécifique.
- Une partie sur $32 - N$ bits identifiant la partie hôte, c'est à dire les appareils individuels au sein du sous-réseau.

Le masque de sous-réseau permet de déterminer le nombre d'appareils (hôtes) auxquels des adresses IP peuvent être attribuées au sein de ce réseau.

Le masque de réseau est utilisé pour "masquer" ou cacher la partie hôte de l'adresse IP en identifiant les bits qui appartiennent au réseau.

Exemple

Le masque de réseau est utilisé pour masquer la partie hôte de l'adresse IP :

- Adresse IP : 192.168.1.10
- Netmask : 255.255.255.0

Ici, les 24 premiers bits (255.255.255) définissent le réseau, et les 8 bits restants (.0) sont réservés aux hôtes. Le masque de sous-réseau est exprimé en **notation décimale pointée**.

Ainsi, tous les appareils d'un même réseau (par ex, 192.168.1.x) partagent la même partie du réseau. Dans cet exemple, il y a 256 valeurs possibles pour le dernier octet. Cependant, il existe deux valeurs réservées pour ce dernier octet :

- 0 pour identifier l'adresse IP du sous-réseau.
- 255 pour identifier l'**adresse de diffusion** (broadcast), permettant d'émettre des messages vers tous les hôtes du sous-réseau

Il y a donc 254 valeurs possibles pour identifier des hôtes sur ce sous-réseau.

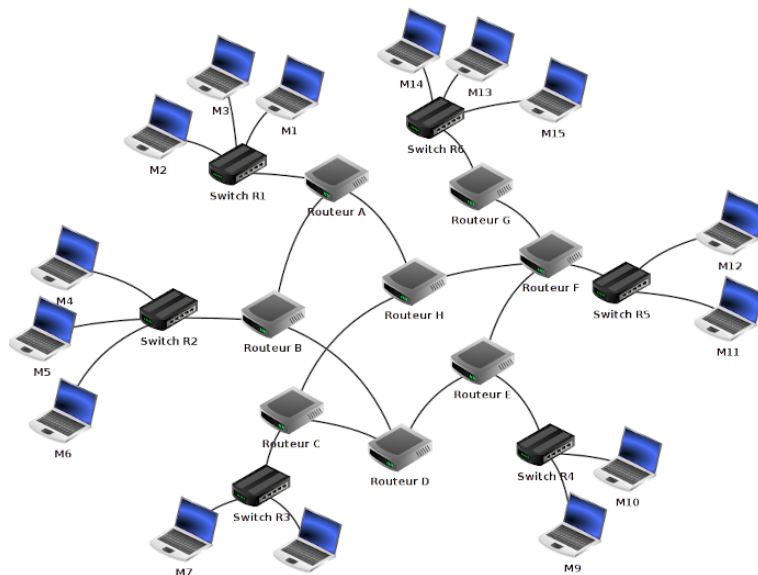
Il existe un autre format pour exprimer le masque de sous-réseau : la **notation CIDR**. Cette notation utilise une barre oblique suivie d'un nombre pour représenter le masque de réseau. Le nombre indique le nombre de bits dans la partie réseau de l'adresse IP.

Exemple - Adresse IP 192.168.1.10/24 : les 24 premiers bits représentent la partie réseau et les 8 bits restants la partie hôte.

III - Routage des paquets

Nous avons sur ce schéma les éléments suivants :

- 15 ordinateurs : M1 à M15
- 6 switchs : R1 à R6
- 8 routeurs : A, B, C, D, E, F, G et H



Nous avons 6 réseaux locaux, chaque réseau local possède son propre switch.

Les ordinateurs M1, M2 et M3 appartiennent au réseau local 1. Les ordinateurs M4, M5 et M6 appartiennent au réseau local 2. Nous pouvons synthétiser tout cela comme suit :

- réseau local 1 : M1, M2 et M3
- réseau local 2 : M4, M5 et M6
- réseau local 3 : M7 et M8
- réseau local 4 : M9 et M10
- réseau local 5 : M11 et M12
- réseau local 6 : M13, M14 et M15

Voici quelques exemples de communications entre 2 ordinateurs :

⇒ **cas n°1 : M1 veut communiquer avec M3**

Le paquet est envoyé de M1 vers le switch R1, R1 "constate" que M3 se trouve bien dans le réseau local 1, le paquet est donc envoyé directement vers M3. On peut résumer le trajet du paquet par : M1 → R1 → M3

⇒ **cas n°2 : M1 veut communiquer avec M6**

Le paquet est envoyé de M1 vers le switch R1, R1 « constate » que M6 n'est pas sur le réseau local 1, R1 envoie donc le paquet vers le routeur A. Le routeur A n'est pas connecté directement au réseau local R2 (réseau local de la machine M6), mais il "sait" que le routeur B est connecté au réseau local 2. Le routeur A envoie le paquet vers le routeur B. Le routeur B est connecté au réseau local 2, il envoie le paquet au Switch R2. Le Switch R2 envoie le paquet à la machine M6.

M1 → R1 → Routeur A → Routeur B → R2 → M6

⇒ **cas n°3 : M1 veut communiquer avec M9**

M1 → R1 → Routeur A → Routeur B → Routeur D → Routeur E → R4 → M9

Restons sur ce cas n°3 : comme vous l'avez peut-être constaté, le chemin donné ci-dessus n'est pas l'unique possibilité, en effet on aurait pu aussi avoir :

M1 → R1 → Routeur A → Routeur H → Routeur F → Routeur E → R4 → M9

Il est très important de bien comprendre qu'il existe souvent plusieurs chemins possibles pour relier 2 ordinateurs.

On peut se poser la question : comment les routeurs procèdent pour amener les paquets à bon port.

Nous avons vu l'année dernière que 2 machines appartenant au même réseau local doivent avoir la même adresse réseau. Dans le schéma ci-dessus M1 et M4 n'ont pas la même adresse réseau (car elles n'appartiennent pas au même réseau local), si M1 cherche à entrer en communication avec M4, le switch R1 va constater que M4 n'appartient pas au réseau local (grâce à son adresse IP), R1 va donc envoyer le paquet de données vers le routeur A. Cela sera donc au routeur A de gérer le "problème" : comment atteindre M4 ?

Chaque routeur possède une **table de routage**.

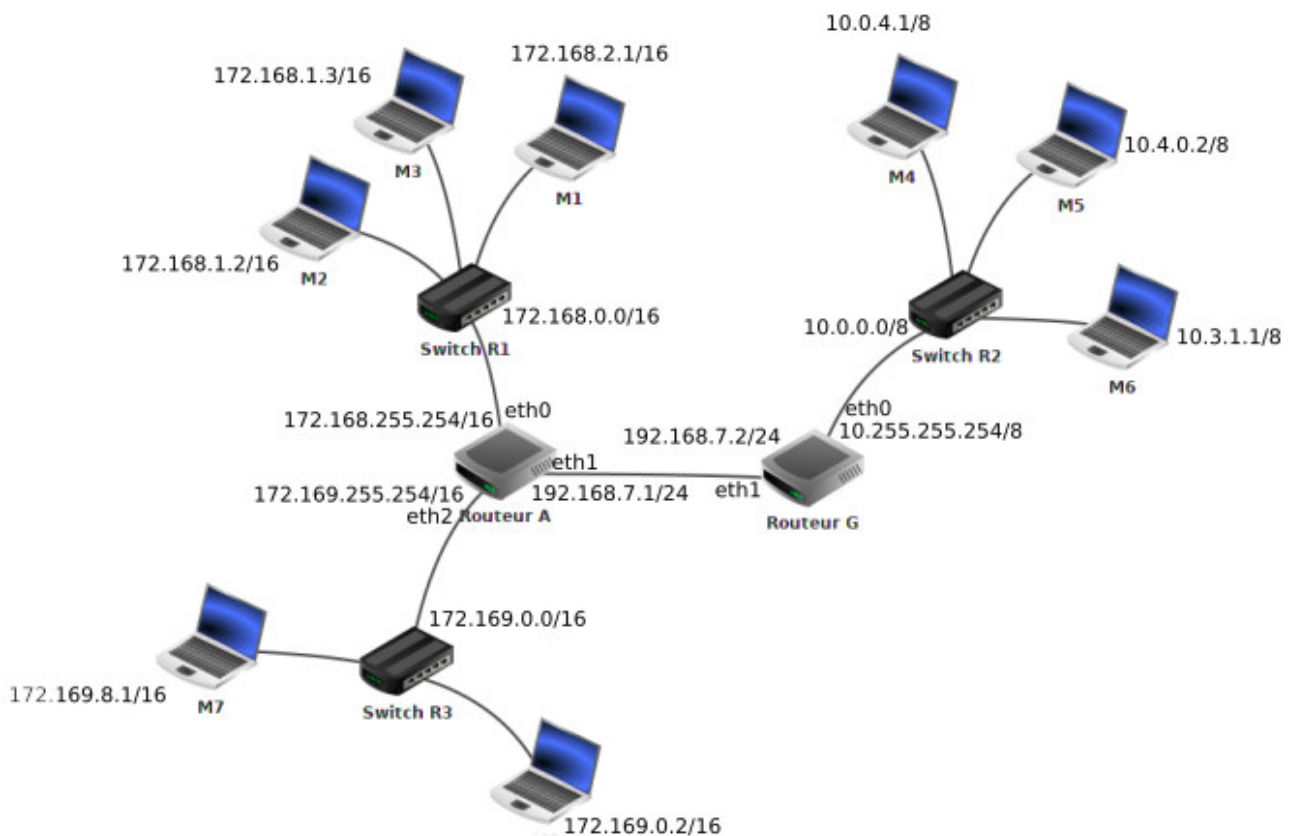
Définition 5

Une **table de routage** peut être vue comme un tableau qui va contenir des informations permettant au routeur d'envoyer le paquet de données dans la "bonne direction". La table de routage d'un routeur contient plusieurs colonnes :

- une **destination** sous la forme d'une adresse sous-réseaux/masque ;
- une **passerelle** qui donne l'adresse IP du prochain routeur voisin pour atteindre cette destination ;
- une **interface** qui indique la carte réseau (ou interface réseau) à utiliser pour atteindre la passerelle ;
- une **métrique** indiquant le "coût" pour atteindre la destination.

Nous allons maintenant considérer le schéma suivant représentant plusieurs réseaux locaux interconnectés par des routeurs. Le schéma indique les adresses IP des interfaces des routeurs ainsi que des machines des réseaux locaux.

Analysons ce schéma et déduisons en les tables de routage du routeur A.



Routeur A

Le routeur A possède 3 interfaces réseau que l'on nomme eth0, eth1 et eth2. Les adresses IP liées à ces interfaces réseau sont :

- eth0 : 172.168.255.254/16
- eth2 : 172.169.255.254/16
- eth1 : 192.168.7.1/24

Voici les informations présentes dans la table de routage de A :

- le routeur A est directement relié au réseau 172.168.0.0/16 par l'intermédiaire de son interface eth0
- le routeur A est directement relié au réseau 172.169.0.0/16 par l'intermédiaire de son interface eth2
- le routeur A est directement relié au réseau 192.168.7.0/24 par l'intermédiaire de son interface eth1 (le réseau 192.168.7.0/24 est un peu particulier car il est uniquement composé des routeurs A et G)
- le routeur A n'est pas directement relié au réseau 10.0.0.0/8 mais par contre il "sait" que les paquets à destination de ce réseau doivent être envoyés à la machine d'adresse IP 192.168.7.2/24 (c'est à dire le routeur G qui lui est directement relié au réseau 10.0.0.0/8)

On peut résumer tout cela avec le tableau suivant (table de routage simplifiée de A)

Destination	Passerelle	Interface	Métrique
172.168.0.0/16		eth0	0
172.169.0.0/16		eth2	0
192.168.7.0/24		eth1	0
10.0.0.0/8	192.168.7.2/24	eth1	1

Table de routage du routeur A

Note : les destinations des tables de routages sont des sous-réseaux identifiés par des adresses IP se terminant par 0.

On peut traduire ce tableau par :

- pour atteindre le réseau R1 (172.168.0.0/16), on doit "sortir" du routeur A par eth0 (le réseau R1 est directement relié au routeur A).
- pour atteindre le réseau R3 (172.169.0.0/16), on doit "sortir" du routeur par eth2 (le réseau R3 est directement relié au routeur A)
- pour atteindre le routeur G (réseau 192.168.7.0/24), on doit "sortir" du routeur par eth1 (le routeur G est directement relié au routeur A)
- pour atteindre le réseau R2 (10.0.0.0/8), on doit "envoyer" le paquet de données vers le routeur G qui "saura quoi faire avec" (le réseau R2 n'est pas directement relié au routeur A)

Dans des réseaux très complexes, chaque routeur aura une table de routage qui comportera de très nombreuses lignes (des dizaines voir des centaines...). En effet chaque routeur devra savoir vers quelle interface réseau il faudra envoyer un paquet afin qu'il puisse atteindre sa destination.

On peut trouver dans une table de routage plusieurs lignes pour une même destination, il peut en effet, à partir d'un routeur donné, exister plusieurs chemins possibles pour atteindre la destination. Dans le cas où il existe plusieurs chemins possibles pour atteindre la même destination, le routeur va choisir le "chemin le plus court".

Pour choisir ce chemin le plus court, le routeur va utiliser la **métrique** : plus la valeur de la métrique est petite, plus le chemin pour atteindre le réseau est "court". Un réseau directement lié à un routeur aura une métrique de 0.

Comment un routeur arrive à remplir sa table de routage ?

La réponse est simple pour les réseaux qui sont directement reliés au routeur (métrique = 0), mais comment cela se passe-t-il pour les autres réseaux (métrique supérieure à zéro) ?

Il existe 2 méthodes :

- le **routage statique** : chaque ligne doit être renseignée "à la main". Cette solution est seulement envisageable pour des très petits réseaux de réseaux
- le **routage dynamique** : tout se fait "automatiquement", on utilise des protocoles qui vont permettre de "découvrir" les différentes routes automatiquement afin de pouvoir remplir la table de routage tout aussi automatiquement.

IV - Protocoles de routage

On trouve plusieurs protocoles de routage dynamiques, nous allons en étudier deux :

- **RIP (Routing Information Protocol)**
- **OSPF (Open Shortest Path First)**

1) Le protocole RIP

Le protocole RIP, pour Routing Information Protocol (ou "protocole d'information de routage" en français), a été conçu dès l'origine d'Internet pour fonctionner sur des réseaux de taille modérée.

Il utilise l'**algorithme de Bellman-Ford** qui prévoit que chaque routeur diffuse régulièrement (toutes les 30 secondes) à ses voisins les routes qu'il connaît, c'est-à-dire la liste des réseaux qu'il peut atteindre et la distance, en nombre de sauts, pour les atteindre.

Ainsi, chaque routeur du réseau reçoit périodiquement (30 sec.) les routes des routeurs voisins. Il les utilise pour effectuer les traitements suivants :

- il met alors à jour sa propre table de routage :
 - si une route reçue comprend un chemin plus court que celui qu'il connaît : il modifie sa table avec ce plus court chemin
 - si une route n'est pas connue, il l'ajoute à sa table en ajoutant 1 au nombre de sauts du voisin qui lui a transmis la route
 - sinon, il n'y a pas de changement
- il émet sa table de routage à tous ses routeurs voisins.

Si un routeur n'a aucune nouvelle d'un voisin pendant 3 minutes (180 sec., c'est le premier timeout), il considère que ce voisin est en panne, toutes les routes passant par lui sont affectées dans la distance infinie (égale à 16) et l'information est diffusée à tous ses voisins qui diffuseront aussi l'information à leurs voisins, etc.

Au bout d'un certain temps supplémentaire (deuxième timeout), si un routeur n'a pas de nouvelle d'un voisin à distance 16, la route est complètement supprimée de sa table.

L'émission périodique des tables permet ainsi de prendre en compte :

- les évolutions du réseaux (apparition/disparition d'un routeur) ;
- la coupure des liaisons ;
- la panne d'un ou plusieurs routeurs.

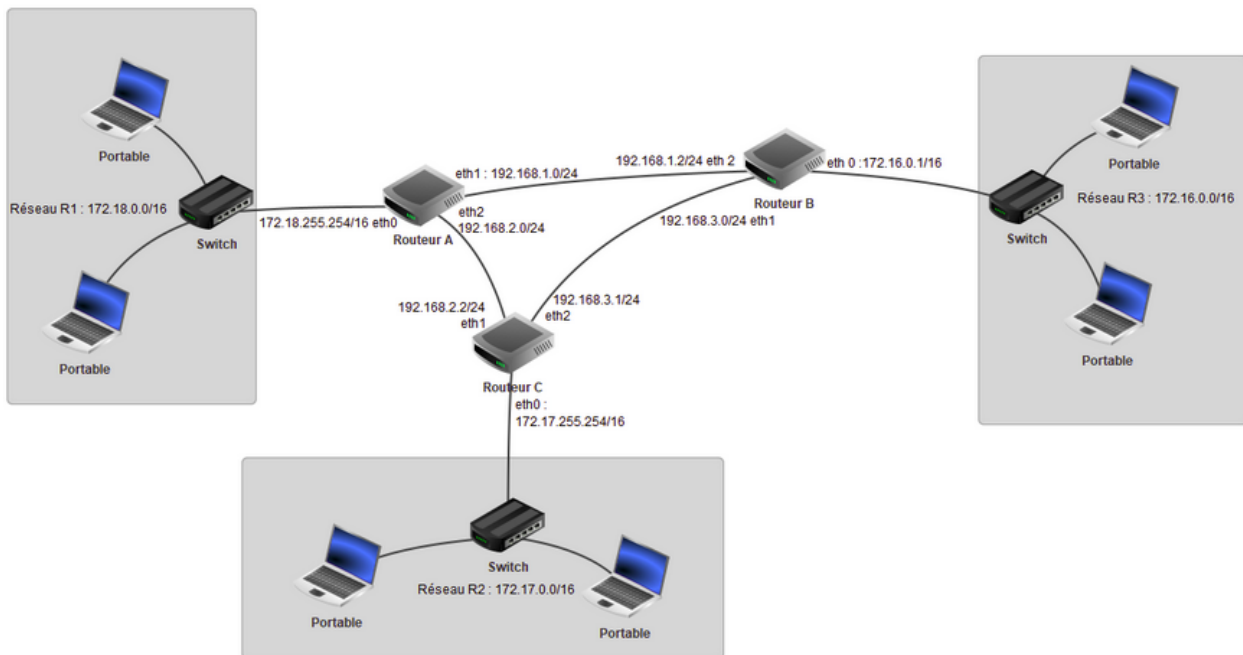
Si tout se passe bien sur le réseau, les tables de routages convergent rapidement. La convergence est plus lente si des pannes ont lieu ou si de nouveaux routeurs apparaissent.

Remarques et inconvénients

- La **métrique** utilisée par le protocole RIP est donc la distance en **nombre de sauts**, autrement dit le **nombre de routeurs traversés** pour atteindre la destination.
Inconvénient : le protocole RIP ne tient alors pas compte de la qualité des liaisons entre les routeurs : pourtant, il se peut très bien qu'une route plus longue (qui traverse davantage de routeurs) soit en réalité plus rapide
- La distance maximale autorisée par le protocole RIP est égale à 15, et ainsi 16 correspond à la distance infinie.
Inconvénient : cela limite l'utilisation du protocole RIP à des réseaux de petite taille
- Les informations ne sont échangées qu'entre voisins directs.
Inconvénient : Un routeur n'a pas de vision au-delà de ses propres voisins et n'a donc jamais connaissance de la topologie du réseau tout entier.

Le protocole RIP est aujourd'hui très rarement utilisé dans les grandes infrastructures. En effet, il génère, du fait de l'envoi périodique de message, un trafic réseau important (surtout si les tables de routages contiennent beaucoup d'entrées).

Exemple



Établissons la table de routage du routeur A en nous basant sur le protocole RIP :

- le routeur A est directement relié au réseau R1 (adresse réseau 172.18.0.0/16) par eth0.
- le routeur A est directement relié au routeur B (réseau 192.168.1.0/24) par eth1
- le routeur A est directement relié au routeur C (réseau 192.168.2.0/24) par eth2
- le routeur A n'est pas directement relié au réseau R2 (adresse réseau 172.17.0.0/16) mais par contre il "sait" qu'il peut l'atteindre soit en passant par le routeur C (adresse 192.168.2.2/24) en une étape ou soit en passant par le routeur B (adresse 192.168.1.2/24) en deux étapes (B et C)
- le routeur A n'est pas directement relié au réseau R3 (adresse réseau 172.16.0.0/16) mais il "sait" qu'il peut l'atteindre soit en passant par le routeur B (192.168.1.2/24) en une étape ou soit en passant par le routeur C (192.168.2.2/24) en deux étapes (C et B)

Ce qui nous donne donc la table de routage suivante :

Destination	Passerelle	Interface	Métrique
172.18.0.0/16		eth0	0
192.168.1.0/24		eth1	0
192.168.2.0/24		eth2	0
172.17.0.0/16	192.168.2.2/24	eth2	1
172.16.0.0/16	192.168.1.2/24	eth1	1

Table de routage du routeur A

Il existe deux routes possibles pour atteindre par exemple le sous-réseau 172.16.0.0/16. Dans ce cas, la table de routage conserve la route avec la métrique la plus faible (ici avec une métrique 1). Idem pour la destination 172.17.0.0/16.

2) Le protocole OSPF

Le **protocole OSPF**, pour Open Shortest Path First, a été développé à partir de 1997 avec l'objectif de remplacer le protocole RIP dont on vient de citer quelques inconvénients.

Dans le protocole OSPF, et cela constitue deux différences fondamentales avec RIP, chaque routeur :

- possède une vision globale de la topologie du réseau
- possède une table de routage qui tient compte de la vitesse de communication entre les routeurs, c'est-à-dire de la qualité des liaisons (bande passante)

Le protocole OSPF se décompose en deux phases importantes :

- 1ère phase : les routeurs s'échangent des messages afin de connaître la topologie complète du réseau (= toutes les liaisons ainsi que leurs débits)
- 2ème phase : chaque routeur applique ensuite un algorithme afin de calculer les chemins les plus rapides vers les différents réseaux

Plus précisément, chaque routeur :

- maintient une carte complète du réseau (topologie)
- calcule les meilleurs chemins localement
- teste périodiquement l'état des liaisons qui le relie à ses voisins et diffuse cet état à tous les routeurs du domaine.
- à la réception d'un message :
 - met à jour la carte des liaisons
 - recalcule, pour chaque liaison modifiée, la nouvelle meilleure route

Les coûts des liaisons selon leur type

Le protocole OSPF associe un coût à chaque type de liaison. Ce coût est inversement proportionnel au débit de transfert et s'obtient généralement par la formule :

$$\text{coût} = \frac{10^8}{\text{débit}}$$

où débit est exprimé en bits/s.

Ainsi, plus le débit d'une liaison est important, plus le coût associé est faible. Les liaisons les plus rapides sont donc celles qui auront le coût le plus faible et donc celles privilégiées dans la recherche du meilleur chemin.

Remarque : La formule du coût peut varier suivant les exercices, celle à utiliser sera indiquée dans l'énoncé (c'est le numérateur qui peut varier).

Voici un tableau regroupant les différents types de liaison ainsi que leurs débits théoriques :

Technologie	BP descendante	BP montante
Modem	56 kbit/s	48 kbit/s
Bluetooth	3 Mbit/s	3 Mbit/s
Ethernet	10 Mbit/s	10 Mbit/s
Wi-Fi	10 Mbit/s ~ 10 Gbits/s	10 Mbit/s ~ 10 Gbits/s
ADSL	13 Mbit/s	1 Mbit/s
4G	100 Mbit/s	50 Mbit/s
Satellite	50 Mbit/s	1 Mbit/s
Fast Ethernet	100 Mbit/s	100 Mbit/s
FFTH (fibre)	10 Gbit/s	10 Gbit/s
5G	20 Gbit/s	10 Gbit/s

Avec la formule de calcul du coût :

- une liaison Fast Ethernet de débit 100 Mbits/s, c'est-à-dire $100 \times 10^6 = 10^8$ bits/s.
Le coût sera alors égal à $\frac{10^8}{10^8} = 1$.
- une liaison Ethernet de débit 10 Mbits/s, c'est-à-dire $10 \times 10^6 = 10^7$ bits/s.
Le coût sera alors égal à $\frac{10^8}{10^1} = 10$.
- etc...

Pour obtenir la **métrique d'une route**, il suffit d'additionner les coûts de chaque liaison (par exemple si pour aller d'un réseau 1 à un réseau 2 on doit traverser une liaison de coût 1, puis une liaison de coût 10 et enfin une liaison de coût 1, la métrique de cette route sera de $1 + 10 + 1 = 12$).

Évidemment, comme dans le cas de RIP, les routes ayant les métriques les plus faibles sont privilégiées.

Exemple

Reprenons l'exemple de réseau précédent (partie protocole RIP) et ajoutons quelques informations concernant les débits des liaisons.

Prenons un exemple avec les débits suivants :

- liaison routeur A - routeur B : 1 Mbps
- liaison routeur A - routeur C : 10 Mbps
- liaison routeur C - routeur B : 10 Mbps

Commençons par calculer les coûts des liaisons inter-routeurs

- liaison routeur A - routeur B : $\frac{10^8}{10^6} = 100$

- liaison routeur A - routeur C : $\frac{10^8}{10^7} = 10$
- liaison routeur C - routeur B : $\frac{10^8}{10^7} = 10$

pour faire :

- Routeur A → Routeur C le coût est de 10
- Routeur A → Routeur B le coût est de 100
- Routeur A → Routeur C → Routeur B le coût est 10+10=20
- Routeur A → Routeur B → Routeur C le coût est 100+10=110

Ce qui nous donne la table de routage suivante :

Destination	Passerelle	Interface	Métrique
172.18.0.0/16		eth0	0
192.168.1.0/24		eth1	0
192.168.2.0/24		eth2	0
172.17.0.0/16	192.168.2.2/24	eth2	10
172.16.0.0/16	192.168.2.2/24	eth2	20

Table de routage du routeur A

Il existe deux routes possibles pour atteindre par exemple le sous-réseau 172.16.0.0/16. Dans ce cas, la table de routage conserve la route avec la métrique la plus faible (ici avec une métrique 20). Idem pour la destination 172.17.0.0/16.

Pour un paquet de données allant de R1 à R2, la route privilégiée sera donc : R1 → Routeur A → Routeur C → R2.

Pour un paquet de données allant de R1 à R3, la route privilégiée sera donc : R1 → Routeur A → Routeur C → Routeur B → R3 (**on constate une différence avec ce que nous avons trouvé avec le protocole RIP**).

V - Recherche du chemin le plus court : algorithme de Dijkstra

La théorie des graphes est une branche des mathématiques et de l'informatique qui consiste à modéliser différents problèmes de la vie réelle sous forme de graphes. L'une des utilisations les plus classiques est la modélisation d'un réseau routier entre différentes villes. L'une des problématiques principales étant l'optimisation des distances entre deux points. Pour trouver le plus court chemin, on utilise souvent l'**algorithme de Dijkstra**.

Cet algorithme est utilisé par les routeurs utilisant le protocole OSPF pour calculer le chemin le plus court entre un routeur et une destination donnée. Le chemin le plus court est donc le chemin ayant le coût le plus faible.

Edsger Dijkstra (on prononce D – Ail – k – stra) s'intéressa à ce problème du plus court chemin sur un graphe. Il proposa en 1959 un algorithme permettant de résoudre ce problème mais il fallut attendre 28 ans, en 1987, pour qu'une autre référence dans le monde des graphes, Tarjan, propose une version « moderne » de cet algorithme de Dijkstra. C'est celui-ci que nous allons étudier dans la suite.

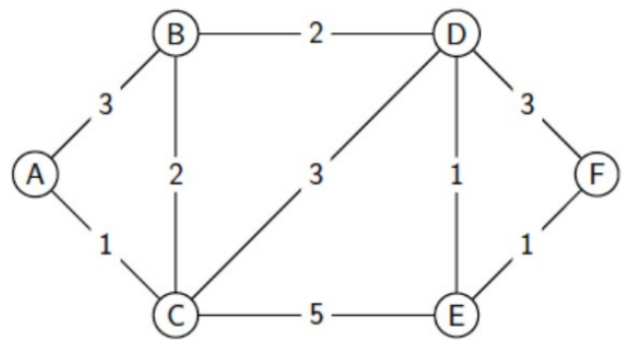
Prenons comme exemple le graphe ci-contre représentant un réseau de routeurs.

- Les sommets de ce graphe sont des routeurs.
- les arrêtes sont les liens entre routeurs. Chaque lien possède un coût.

L'objectif est de rechercher le chemin le plus court pour aller du routeur A au routeur F.

Très vite se pose un problème : comment déterminer le plus court chemin entre deux sommets ?

C'est là que l'algorithme de Dijkstra intervient !



Principe de fonctionnement de l'algorithme de Dijkstra

Tout au long de l'algorithme on va garder en mémoire le chemin le plus court depuis A pour chacune des autres routeurs dans un tableau. On répète toujours le même processus :

1. On choisit le sommet accessible de distance minimale comme sommet à explorer.
2. A partir de ce sommet, on explore ses voisins et on met à jour les distances pour chacun. On ne met à jour la distance que si elle est inférieure à celle que l'on avait auparavant.
3. On répète jusqu'à ce qu'on arrive au point d'arrivée ou jusqu'à ce que tous les sommets aient été explorés.

Le tableau de la page suivante indique les différentes étapes permettant de calculer le chemin le plus en utilisant l'algorithme de Dijkstra.

Etape 1

- On démarre du sommet A , on indique 0 dans la case car on a parcouru 0
- On ne reviendra plus en A donc on considère le sommet comme traité et place des croix dans la colonne du routeur A.
- Depuis A, on peut atteindre B distant de 3 ou C distant de 1 donc on indique 3-A dans la colonne B et 1-A dans la colonne C.
- On conserve alors le plus court c'est à dire **1-A**.

A	B	C	D	E	F
0	3-A	1-A			
x		1-A			
x					
x					
x					
x					

Etape 2

- On redémarre donc de C. On ne reviendra plus en C donc on place les croix dans la colonne C.
- De C, on peut atteindre D, E ou B
 - si on va en D, on parcourt 3 en plus donc depuis le départ $1+3=4$, on écrit 4-C
 - si on va en E, on parcourt 5 en plus donc depuis le départ $1+5=6$ et on écrit 6-C
 - si on va en B, on parcourt 2 en plus donc depuis le départ $1+2=3$ et on écrit 3-C
- On conserve le plus court et ici on a le choix entre 3-A ou 3-C prenons 3-A

A	B	C	D	E	F
0	3-A	1-A			
x	3-C	1-A	4-C	6-C	
x	3-A	x			
x		x			
x		x			
x		x			

Etape 3

- On redémarre donc de B, on n'y reviendra plus donc on place les croix dans la colonne B.
- on ne peut atteindre que D distant de 2 donc depuis le départ $3+2=5$ et on écrit 5-B
- On conserve le plus court c'est à dire 4-C. **Attention, il faut regarder toutes les cases des colonnes qui n'ont pas de x (déjà visitées).**
Explication : Dans la colonne D, il y a deux chemins possibles pour atteindre D, un chemin venant de C avec un coût de 4 et un chemin venant de B avec un coût de 5. On conserve donc le chemin le plus court venant de C.

A	B	C	D	E	F
0	3-A	1-A			
x	3-C	1-A	4-C	6-C	
x	3-A	x	5-B		
x	x	x	4-C		
x	x	x			
x	x	x			

Etape 4

- On redémarre donc de D, on n'y reviendra plus donc on place les croix dans la colonne D.
- on peut atteindre E et F donc comme précédemment, on indique les distances parcourues : 5-D et 7-D
- On conserve le plus court c'est à dire 5-D

A	B	C	D	E	F
0	3-A	1-A			
x	3-C	1-A	4-C	6-C	
x	3-A	x	5-B		
x	x	x	4-C	5-D	7-D
x	x	x	x	5-D	
x	x	x	x		

Etape 5

- On redémarre donc de E, on n'y reviendra plus donc on place les croix dans la colonne E.
- On peut atteindre F donc comme précédemment on indique la distance parcourue : 6-E
- On conserve le plus court c'est à dire 6-E

A	B	C	D	E	F
0	3-A	1-A			
x	3-C	1-A	4-C	6-C	
x	3-A	x	5-B		
x	x	x	4-C	5-D	7-D
x	x	x	x	5-D	6-E
x	x	x	x	x	6-E

Dernière étape

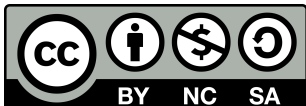
Il ne reste plus qu'à décrire le plus court chemin et pour cela on remonte l'algorithme :

- On part de F.
- De F, le chemin le plus court provient de E avec un coût de 6 (6-E).
- De E, le chemin le plus court provient de D avec un coût de 5 (5-D).
- De D, le chemin le plus court provient de C avec un coût de 4 (4-C).
- De C, le chemin le plus court provient de A avec un coût de 1 (1-A).
- On arrive donc au routeur A.

donc le plus court chemin est A ; C ; D ; E ; F avec un coût de 6.

Remarque : Ce tableau nous donne également les plus courts chemins pour aller du routeur A vers les routeurs B, C, D et E.

Pour aller de A à B, le plus court chemin a un coût de 3 et il y a deux chemins possibles : soit de A ; B, soit A ; C ; B.



Sources :

- Lycée Mounier - Angers
- <https://pixees.fr>