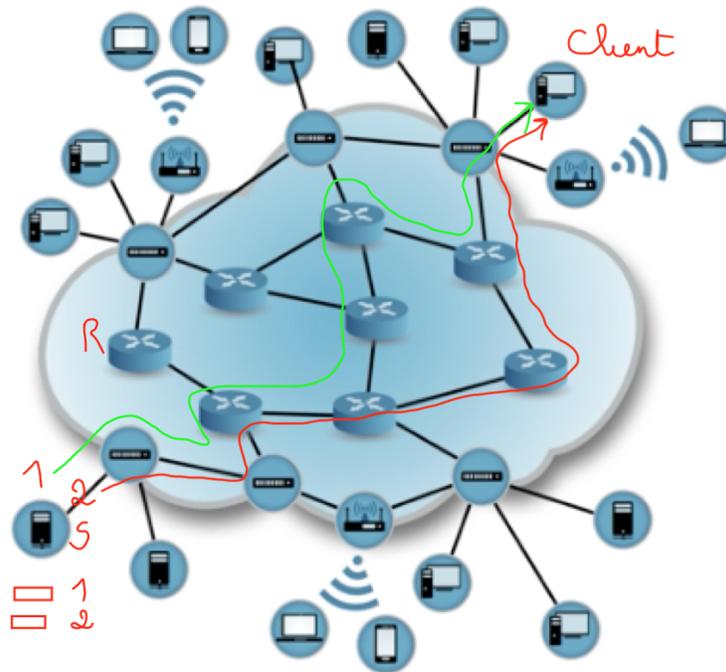


# Protocoles de routage

## 1 Commutation de paquets



On appelle **client** un ordinateur qui demande une ressource à un autre ordinateur appelé **serveur**

Imaginons qu'un client (en haut de l'image) veuille télécharger un document relativement volumineux (un pdf de plusieurs pages) chez un serveur S (en bas à gauche)

Le document est **découpé** en paquets étiquetés et numérotés puis ces paquets vont suivre **des trajectoires indépendantes** le long du trajet du serveur au client.

Les **routeurs** R (symboles avec 4 flèches comme des carrefours) font la circulation des paquets, de manière autonome à l'aide d'algorithmes

On a dessiné pour l'exemple deux trajectoires différentes pour les paquets 1 et 2

Ensuite chez le client le document est reconstitué en tenant

compte de la numérotation des paquets.

**l'idée de la commutation des paquets** signifie donc que :

1. Le document au delà d'une certaine taille (1500 octets) est découpée en paquets
2. Ces paquets sont commutés (aiguillés) indépendamment les uns des autres en fonction de la densité de circulation sur le réseau

## 2 Systèmes autonomes

```
/> traceroute 192.168.0.10
Établissement de la connexion avec 192.168.0.10 (en 20 sauts max.).
 1  192.168.96.1
 2  10.0.1.2
 3  10.0.5.2
 4  192.168.0.10

192.168.0.10 a été atteint en 4 sauts.
```

La connexion entre un client et un serveur n'est pas directe, il existe de nombreux relais entre le client et le serveur on appelle ces relais des **routeurs** et leur rôle est fondamental dans l'acheminement des données entre le client et le serveur grâce à l'adressage IP

Dans un terminal si on entre la commande `traceroute example.com` ou `tracert example.com`, on observe la suite des routeurs reliant la box 192.168.1.1 au serveur 93.184.216.34 hébergeant le domaine example.com

A l'aide du site RIPEstat on peut ranger les routeurs en trois groupes ou **systèmes autonomes** le premier celui de ORANGE, le second celui de TELIA et enfin le dernier celui de EDGE-CAST

Il existe plus de 50 000 systèmes autonomes, on peut voir ici les principaux systèmes autonomes <http://as-rank.caida.org>.

Au lieu de regarder Internet comme un ensemble d'ordinateurs interconnectés dans le monde on peut regarder Internet comme un ensemble de réseaux (les systèmes autonomes) interconnectés

Un organisme (Center for Applied Internet Data Analysis ) a proposé une visualisation d'Internet à partir des systèmes autonomes (Voir <http://caida.org>)

La circulation des paquets entre plusieurs systèmes autonomes nécessite **un protocole de routage externe** aux systèmes autonomes comme le protocole BGP (Border Gateway Protocol)

Nous allons nous intéresser cette année aux protocoles de routage des paquets uniquement à l'intérieur des systèmes autonomes, les protocoles RIP (Routing Information Protocol) et OSPF (Open Shortest Path First)

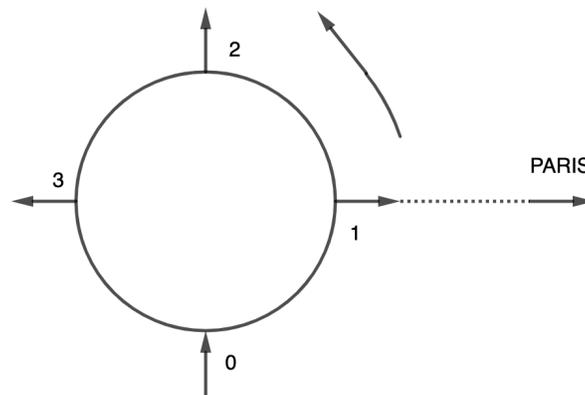
### 3 Tables de routage

Il existe une analogie entre la circulation des paquets dans l'Internet et la circulation routière

Un rond-point ressemble d'une certaine manière à un routeur. Imaginons que l'on cherche à rejoindre Paris en voiture et que l'on se trouve près de Bordeaux

Avant d'entrer dans un rond-point (entrée 0) un logiciel de navigation va nous conseiller de prendre la première sortie du rond-point pour rejoindre la direction de Paris

Les entrées-sorties du rond-point sont les équivalents des **interfaces** d'un routeur, les entrées sorties du routeur



Chaque interface d'un routeur est caractérisée par une adresse IP, ce qui fait qu'un routeur a plusieurs adresses IP, une par interface

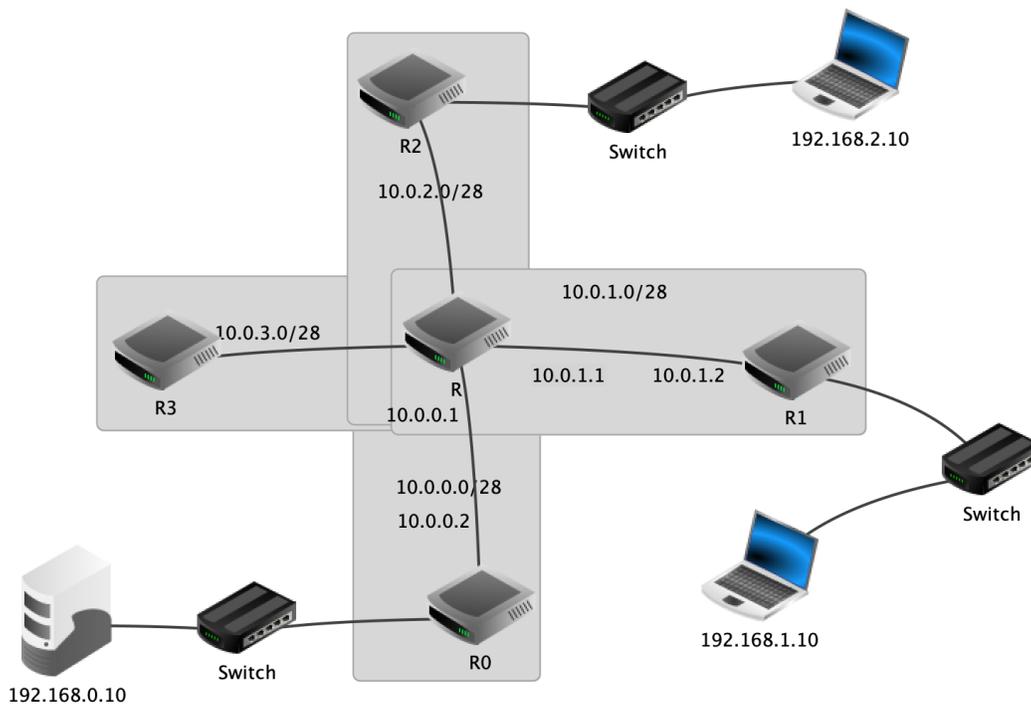
Lorsque deux routeurs R1 et R2 sont connectés, ils sont alors dans le même réseau et dans ce réseau caractérisé par une adresse réseau, ils ont chacun une adresse IP,  $adr(R1)$  et  $adr(R2)$

Si R1 doit relayer un paquet **à destination de** l'adresse IP a.b.c.d **en passant par** R2 alors dans **la table de routage** de R1 il y aura une ligne comme

IP de destination	Masque	Passerelle suivante	Via l'interface
a.b.c.d	....	adr(R2)	adr(R1)

Regardons cela plus en détail dans l'exemple suivant où le routeur R remplace le rond-point précédent

Si un paquet part du serveur 192.168.0.10 en destination du client 192.168.1.10, **il n'y a qu'une seule route possible en passant par les routeurs R0 puis R puis R1**



Pour relayer ce paquet dans la table de routage de R0 il y aura

IP de destination	Masque	Passerelle suivante	Via l'interface
192.168.1.10	255.255.255.0	10.0.0.1	10.0.0.2

En effet le paquet doit "sortir" de R0 par son interface 10.0.0.2 pour suivre la direction, la passerelle 10.0.0.1

Puis le routeur R va relayer ce paquet grâce à une ligne

IP de destination	Masque	Passerelle suivante	Via l'interface
192.168.1.10	255.255.255.0	10.0.1.1	10.0.1.2

En effet pour le routeur R il y a plusieurs sorties possibles

mais pour aller vers R1, il faut prendre l'interface 10.0.1.1 puis la passerelle 10.0.1.2

Ce n'est pas le cas dans notre exemple mais dans la réalité **à une interface il peut y avoir plusieurs passerelles possibles**

**Enfin dans la réalité il existe plusieurs routes possibles** d'où les problèmes suivants

1. Comment choisir telle route plutôt que telle autre ?
2. Qui décide du choix ?
3. Comment gérer les pannes de connexion entre les routeurs ?

On aurait pu laisser à une autorité centrale le soin de remplir les tables de routage et de réparer les pannes. (**routage centralisé et statique**)

On a préféré mettre au point des **protocoles**, nécessitant **l'échange d'informations entre les routeurs** et s'appuyant ensuite sur des **algorithmes** exécutés régulièrement sur chaque routeur, pour mettre à jour les tables de routage (**routage dynamique**)

## 4 Le protocole RIP ou protocole à vecteur de distance

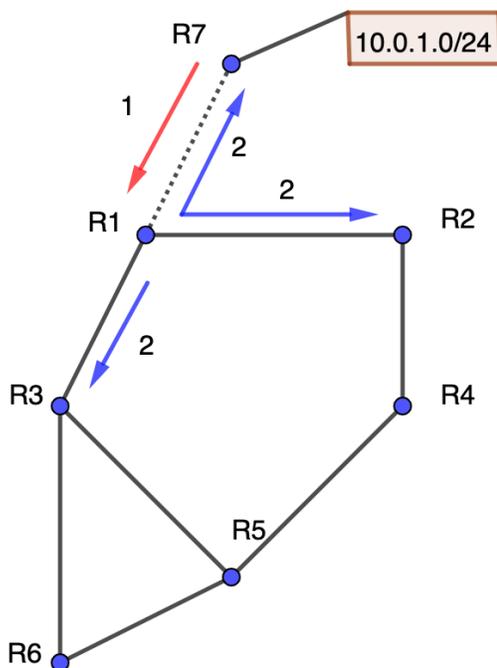
Le protocole RIP (Routing Information Protocol) est un protocole de routage consistant à **minimiser le nombre de sauts entre les routeurs** pour acheminer un paquet d'une machine à une autre

Chaque routeur envoie régulièrement à ses voisins les **vecteurs** (adresse réseaux ,nombre de sauts) qu'il connaît

Lorsqu'un routeur reçoit une telle information

1. s'il ne connaît pas le réseau il rajoute le vecteur dans sa table de routage **en ajoutant un au nombre de sauts** et conserve l'information de l'expéditeur qui est la passerelle
2. s'il connaît déjà le réseau, il y a plusieurs cas possibles :
  - (a) **La passerelle est différente et le nombre de sauts est supérieur à celui qu'il a dans sa table**, dans ce cas il ignore cette information
  - (b) **La passerelle est différente et le nombre de sauts est strictement inférieur à celui qu'il a dans sa table**, dans ce cas il efface l'ancienne information et conserve la nouvelle passerelle et le nombre de sauts + 1
  - (c) **La passerelle est identique mais le nombre de sauts est strictement supérieur à ce qu'il a dans sa table** cela signifie qu'une panne est apparue sur cette route, dans ce cas il efface l'ancienne information et conserve la passerelle et le nombre de sauts + 1

Regardons cela sur un exemple



Un nouveau routeur R7 associé au réseau 10.0.1.0/24 est relié à R1

R7 étant directement relié à ce réseau 10.0.1.0/24, il n'y a pas de passerelle et le coût en nombre de sauts est 1

Dans la table de routage de R7 il y a donc une ligne comme celle-ci

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	...	1

1. R7 "signale" sa présence à R1 en lui signifiant aussi qu'il est associé à un réseau d'adresse 10.0.1.0/24 (flèche rouge)  
R1 ne connaît pas ce réseau donc ajoute dans sa table

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R7	2

2. R1 communique à ses voisins l'information qu'il connaît un réseau 10.0.1.0/24 qui est à deux sauts

R7 reçoit cette information et ajoute un au nombre de sauts, autrement dit il y a un réseau 10.0.1.0/24 qui est à 3 sauts et qui passe par R1 mais dans sa table de routage il y a mieux puisque le réseau 10.0.1.0/24 est directement accessible, donc il ne modifie pas sa table de routage

R2 reçoit cette information et donc met dans sa table

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R1	3

De même pour R3

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R1	3

3. L'information va se propager de proche en proche et ainsi R5 va recevoir de R4 le vecteur suivant (10.0.1.0/24, 4) et de R3 le vecteur (10.0.1.0/24, 3) d'où la nouvelle ligne dans la table de R5

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R3	4

4. Finalement R6 aura dans sa table de routage

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R3	4

Maintenant **supposons que la connexion entre les routeurs R3 et R6 tombe en panne**

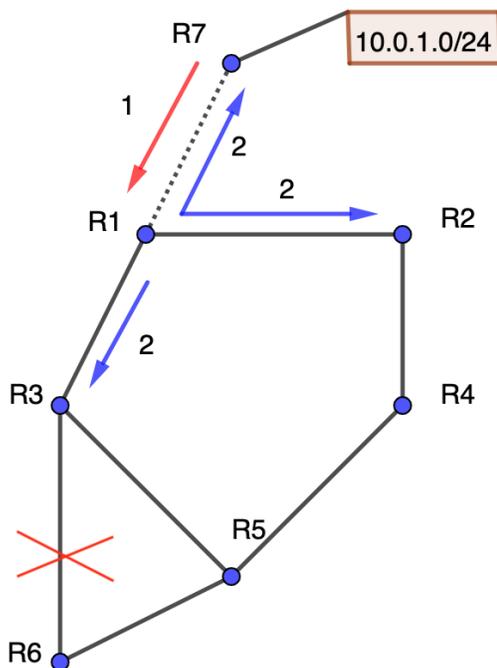
R6 se rendra compte de cela au bout d'un certain temps parce qu'il ne recevra plus d'information provenant de R3

Dans ce cas dans la table de routage de R6 il y aura cette modification

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R3	16

Pourquoi 16 ?

Le protocole RIP limite à 15 le nombre de sauts possible par conséquent d'une certaine manière la valeur 16 représente un "infini"



Cependant R5 communique régulièrement avec R6 et lui an-

nonce le vecteur (10.0.1.0/24, 4) donc rapidement R6 va mettre à jour sa table de routage

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R5	5

Regardons un autre cas de panne

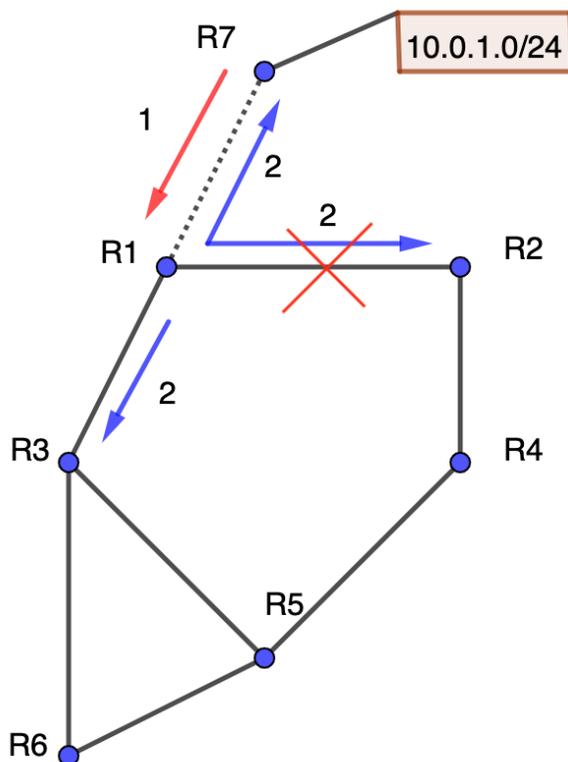
Supposons cette fois ci que la connexion entre R1 et R2 tombe en panne donc R2 met à jour sa table de routage

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R1	16

R4 reçoit de R2 le vecteur (10.0.1.0/24, 16) or dans la table de routage de R4 la passerelle pour atteindre 10.0.1.0/24 est R2, cela signifie qu'il y a un problème sur la route de R4 à 10.0.1.0/24

Donc R4 met à jour sa table de routage

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R2	16



Au bout d'un moment R4 va recevoir de R5 le vecteur (10.0.1.0/24, 4) et donc mettre à jour sa table de routage

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R5	5

Finalement R2 va recevoir de R4 le vecteur (10.0.1.0/24, 5) et donc mettre à jour sa table de routage

Réseau	Passerelle suivante	Nombre de sauts
10.0.1.0/24	R4	6

## 5 Boucles de routage

Lorsqu'un paquet tourne en boucle dans un réseau sans arriver à destination on parle alors de **boucle de routage**

Déjà le protocole IP a un mécanisme pour éviter un tel phénomène, basé sur un compteur de durée de vie d'un paquet appelé TTL (Time To Live) .

Un paquet a une durée de vie qui est un entier, égal au nombre maximum de routeurs que le paquet peut traverser. Cette durée de vie est diminuée de 1 à chaque fois que le paquet traverse un routeur

Lorsqu'un routeur reçoit un paquet de durée vie égale à 0, il le détruit.

On rappelle que le protocole TCP associe à chaque paquet un accusé de réception de telle sorte qu'un paquet détruit sera renvoyé par l'expéditeur

Le protocole RIP ajoute des règles pour éviter les boucles de routage

## 6 Le protocole OSPF ou protocole à état de liens

Le protocole RIP ne tient pas compte de **l'état des liens entre les routeurs**

Le protocole OSPF (pour Open Short Path First) prend en compte le **débit d'information** sur les liens entre les routeurs (On appelle cela la **bande passante** exprimée en bit/s )

A la différence du protocole RIP ou le coût d'une liaison entre deux routeurs est le nombre de sauts, pour le protocole OSPF le coût d'une liaison est défini par

$$\text{coût} = \frac{10^8}{\text{bande passante}}$$

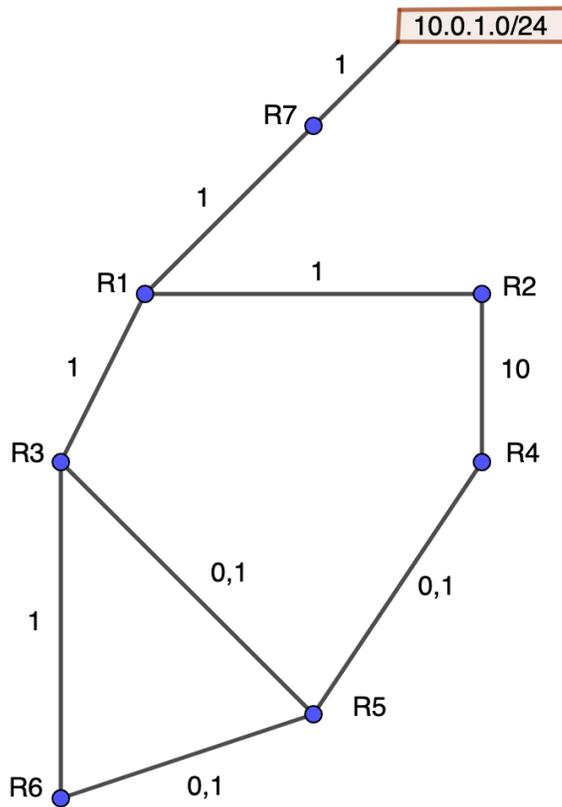
Le nombre  $10^8$  a été choisi pour que le coût d'une liaison *FastEthernet*, dont la bande passante est  $10^8$  bit/s, soit égale à 1

Voici quelques coûts :

- Pour une liaison *Ethernet*, la bande passante est  $10^7$  bit/s le coût est donc de 10
- Pour une liaison *Fibre*, la bande passante est  $10^9$  bit/s le coût est donc de 0,1

### 6.1 Echange d'informations

Dans le cadre d'un protocole de routage décentralisé et dynamique il faut au préalable un échange d'informations entre les routeurs



1. Dans un premier temps **chaque routeur échange avec ses voisins** (ceux qui partagent avec lui un même sous-réseau, sans être directement reliés par un câble car entre eux il peut y avoir des commutateurs) des paquets "Hello" Ce sont des petits paquets d'informations, émis régulièrement (toutes les 10 ou 30 secondes)

Cela permet à chaque routeur de connaître la qualité des liens (en bande passante) qu'il a avec ses voisins et aussi éventuellement de détecter rapidement des pannes (quelques minutes)

Par exemple le routeur R3 aura au bout d'un moment la connaissance suivante de ses voisins

Routeur	Voisin	Coût
	R1	1
	R5	0,1
	R6	1

2. Dans un second temps **chaque routeur diffuse à l'ensemble de son réseau** (un système autonome) la table de coût des liaisons avec ses voisins de telle sorte que chaque routeur ait au bout d'un certain temps une cartographie de l'ensemble du réseau auquel il appartient (un tableau de coûts à deux dimensions)

## 6.2 Algorithme de plus court chemins dans un graphe pondéré :

Une fois que chaque routeur a la cartographie de son réseau, il exécute l'algorithme de Dijkstra pour trouver les chemins les plus courts partant de lui et à destination des autres routeurs

Ainsi par exemple pour le routeur R3 on aura la table des chemins les plus courts

Routeur	Route	Coût
R1	R3-R1	1
R2	R3-R1-R2	2
R4	R3-R5-R4	0,2
R5	R3-R5	0,1
R6	R3-R5-R6	0,2
R7	R3-R1-R7	2

Cette table va servir à la construction de la table de routage de R3

L'algorithme de Dijkstra assure qu'il n'y a pas de boucle de routage

## 7 Surcout des protocoles

On appelle surcout d'un protocole le volume d'informations échangées entre les routeurs qui ne sont pas des données

Avec le protocole RIP chaque routeur envoie régulièrement à ses voisins sa table de routage ce qui représente un quantité conséquente d'informations

A l'inverse avec le protocole OSPF chaque routeur envoie régulièrement peu d'informations (paquet "Hello") à ses voisins directs et de temps à autre il envoie à tous les routeurs de son réseau la table de coût des liaisons avec ses voisins, ce qui représente dans l'ensemble un surcoût moindre que le protocole RIP

## 8 Exercices

### Ex 1

On considère une machine d'adresse IPv4 10.38.133.5/16

1. Donner l'adresse réseau dans lequel se trouve cette machine
2. Donner l'adresse de diffusion (broadcast) de ce réseau
3. Donner le nombre maximal de machines que l'on peut connecter sur ce réseau
4. On souhaite ajouter une machine sur ce réseau, proposer une adresse IPv4 possible pour cette machine

### Ex 2

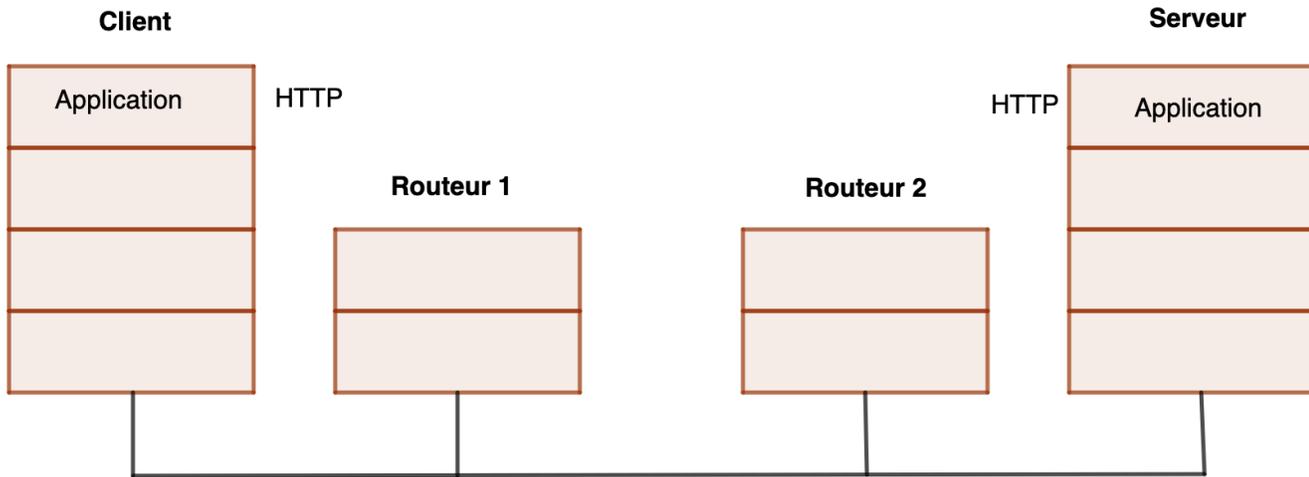
Est ce que les machines d'adresses IPv4 192.168.203.15/21 et 192.168.200.65 sont dans le même sous-réseau ?

### Ex 3

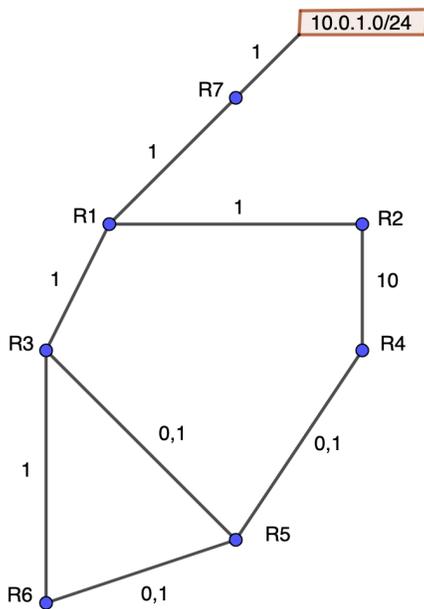
Le modèle TCP/IP de communication entre des ordinateurs est constitué de différentes couches citées ci-après dans le désordre :

**Réseau, Application, Lien, Transport**

Compléter le schéma suivant en ajoutant pour chaque couche au moins un protocole



### Ex 4



Sans utiliser de protocole donner toutes les routes valides allant du routeur R7 au routeur R5

## Ex 5

Internet est régulé par l'IETF (Internet Engineering Task Force)

Des notes appelées RFC (Requests For Comments) émises par l'IETF décrivent les technologies utilisées pour Internet

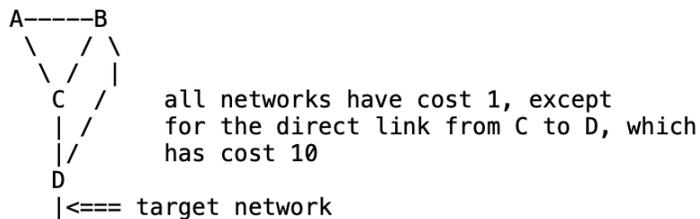
Par exemple voici un extrait du RFC 2453 à propos du protocole RIP version 2

De quoi parle cet extrait ?

RFC 2453

RIP Version 2

November 1998



Each router will have a table showing a route to each network.

However, for purposes of this illustration, we show only the routes from each router to the network marked at the bottom of the diagram.

D: directly connected, metric 1  
B: route via D, metric 2  
C: route via B, metric 3  
A: route via B, metric 3

Now suppose that the link from B to D fails. The routes should now adjust to use the link from C to D. Unfortunately, it will take a while for this to happen. The routing changes start when B notices that the route to D is no longer usable. For simplicity, the chart below assumes that all routers send updates at the same time. The chart shows the metric for the target network, as it appears in the routing table at each router.

```
time ----->
D: dir, 1  dir, 1  dir, 1  dir, 1  ...  dir, 1  dir, 1
B: unreach C, 4  C, 5  C, 6  ...  C, 11  C, 12
C: B, 3  A, 4  A, 5  A, 6  ...  A, 11  D, 11
A: B, 3  C, 4  C, 5  C, 6  ...  C, 11  C, 12
```

dir = directly connected  
unreach = unreachable

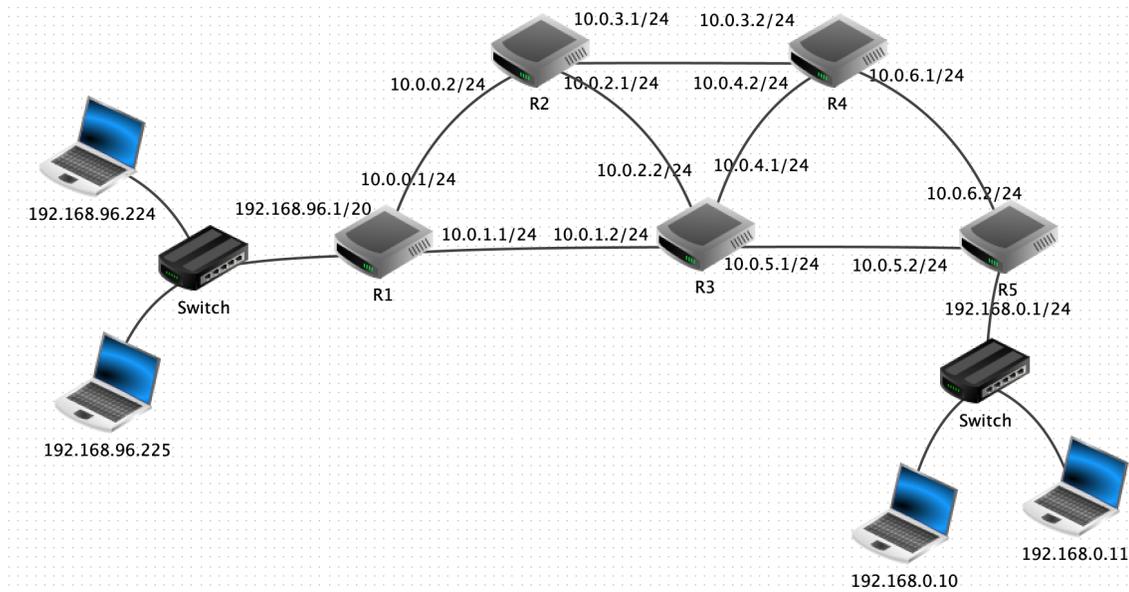
## Ex 6

On représente ci-dessous un réseau dans lequel R1, R2, R3, R4 et R5 sont des routeurs

L'ordinateur 192.168.96.225 ainsi que le routeur R1 font partie du réseau 192.168.96.0/20

L'interface du routeur R1 vers le réseau 192.168.96.0/20 est 192.168.96.1

La passerelle de l'ordinateur 192.168.96.225 pour sortir du réseau 192.168.96.0/20 en passant par le routeur R1 est 192.168.96.1



1. Un paquet part de l'ordinateur 192.168.96.225 vers l'ordinateur 192.168.0.10. En supposant que ce réseau utilise le protocole RIP donner la succession des routeurs traversés par ce paquet (argumenter)
2. Ajouter dans la table de routage de chaque routeur traversé deux lignes (l'une pour l'aller du réseau 192.168.96.0 vers 192.168.0.0, et l'autre pour le retour ) sous la forme suivante :

Table du routeur R.... :

Réseau destinataire | Passerelle | Interface

.....|.....|.....

3. Dans un terminal de l'ordinateur 192.168.96.225 on entre la commande

tracertoute 192.168.0.10 et on observe alors

```
> tracertoute 192.168.0.10
Établissement de la connexion avec 192.168.0.10 (en 20 sauts max.).
 1  192.168.96.1
 2  10.0.1.2
 3  10.0.5.2
 4  192.168.0.10

192.168.0.10 a été atteint en 4 sauts.
```

Expliquer le résultat obtenu

4. Pour tenir compte du débit des liaisons on décide d'utiliser maintenant le protocole OSPF pour effectuer le routage. Le coût des liaisons entre les routeurs est donné par le tableau suivant :

Liaison	R1-R2	R1-R3	R3-R5	R2-R3	R3-R4	R4-R5
Coût	10	100	?	10	10	10

- (a) Le coût d'une liaison est donné par la formule :

$$C = \frac{10^9}{BP}$$

où BP est la bande passante de la connexion en bps (bit par seconde)

Sachant que la bande passante de la liaison R3-R5 est de 100 Mbps, calculer le coût correspondant

- (b) Déterminer le chemin parcouru par un paquet partant de la machine A pour aller vers la machine B en utilisant le protocole OSPF (argumenter)
- (c) Faut-il modifier la table de routage du routeur R1 ? Si oui le faire