



### Table des matières

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Définition  | 1  |
| 2   | Le routage et la Table de Routage dans un sous-reseau                               | 2  |
| 3   | RIP (Routing Information Protocol).   | 5  |
| 4   | Open Shortest Path First (OSPF)   | 8  |
| 5   | Algorithme du plus courts chemin : Algorithme de Dijkstra                           | 10 |
| 5.1 | La méthode graphique . . . . .  | 10 |
| 5.2 | La méthode par tableau . . . . .  | 11 |
| 6   | Exercice Type Bac : Réseaux en général et les protocoles RIP et OSPF en particulier | 13 |
| 7   | Programmons l'algorithme de Dijkstra (Sur Capytale)                                 | 15 |

Un réseau de réseaux comportant des routeurs peut être modélisé par un graphe (si nécessaire revoir le cours sur les graphes) : chaque routeur est un sommet et chaque liaison entre les routeurs ou entre un routeur et un switch est une arête. Les algorithmes utilisés par les protocoles de routages sont donc des algorithmes issus de la théorie de graphes.

On trouve plusieurs protocoles de routage, nous allons en étudier deux : RIP (Routing Information Protocol) et OSPF (Open Shortest Path First).

## 1 Définition

### Définition 1 (Protocole de routage)

Dans un réseau de communication, un protocole de routage est un protocole qui permet à chaque routeur de communiquer aux autres routeurs du réseau.

### Définition 2 (Métrique)

Dans un protocole de routage, la métrique est une mesure de la "distance" qui sépare un routeur d'un réseau de destination.

Elle peut correspondre soit :

- au nombre de sauts nécessaires pour atteindre le réseau destination, comme dans RIP (Routing Information Protocol) ;
- ou à un coût numérique qui dépend de la bande passante des liens franchis, comme dans OSPF (Open Shortest Path First) ;
- ou au résultat d'un calcul plus complexe, qui tient compte de la charge, du délai, du MTU (Maximum Transmission Unit), etc.

Quand plusieurs chemins vers une même destination sont possibles, le protocole préférera celui dont la métrique est la plus faible.



### MTU

Lors d'une transmission de données informatiques, la maximum transmission unit (MTU) est la taille maximale d'un paquet pouvant être transmis en une seule fois (sans fragmentation) sur une interface

## 2 Le routage et la Table de Routage dans un sous-reseau

Dans un réseau chaque machine possède une table de routage qui indique le prochain routeur à suivre pour rejoindre un sous-réseau. Pour contruire cette table on utilise un protocole qui va construire la table.



### Méthode

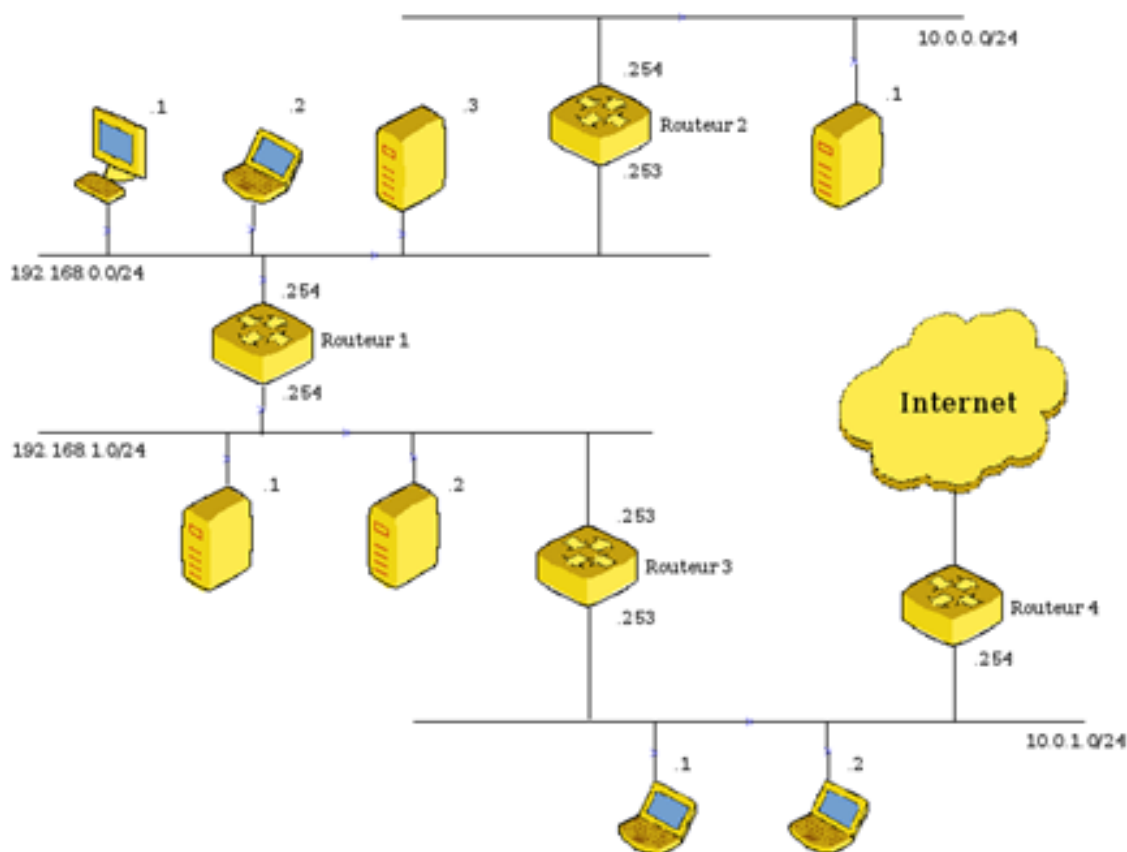
1. Indiquer les réseaux auxquels ma machine est connectée
2. Indiquer la route par défaut par sa passerelle.
3. Indiquer tous les autres réseaux que je ne peux pas encore joindre
4. Indiquer les passerelles



### Attention Passerelle

- Une passerelle est une machine qui permet de rentrer dans un sous-réseau.
- Une passerelle est toujours une machine et une adresse IP du du sous-réseau **dans lequel se trouve la machine** dont on fait la table de routage.
- La passerelle pour rentrer dans le propre réseau de la machine dont on fait la table de routage est elle-même.

**Exemple :** Construisons la table du Routeur 1



1. On indique les réseaux auxquels ma machine est connectée

| Réseau à joindre | Passerelle |
|------------------|------------|
| 192.168.0.0/24   |            |
| 192.168.1.0/24   |            |

TABLE 1 – Table de routage du Routeur 1

2. On indique la route par défaut

| Réseau à joindre     | Passerelle    |
|----------------------|---------------|
| 192.168.0.0/24       |               |
| 192.168.1.0/24       |               |
| Default ou 0.0.0.0/0 | 192.168.1.253 |

TABLE 2 – Table de routage du Routeur 1

3. On indique tous les autres réseaux que je ne peux pas encore joindre

| Réseau à joindre     | Passerelle    |
|----------------------|---------------|
| 192.168.0.0/24       |               |
| 192.168.1.0/24       |               |
| Default ou 0.0.0.0/0 | 192.168.1.253 |
| 10.0.0.0/24          |               |

TABLE 3 – Table de routage du Routeur 1

4. On indique les passerelles

| Réseau à joindre     | Passerelle    |
|----------------------|---------------|
| 192.168.0.0/24       | 192.168.0.254 |
| 192.168.1.0/24       | 192.168.1.254 |
| Default ou 0.0.0.0/0 | 192.168.1.253 |
| 10.0.0.0/24          | 192.168.0.253 |

TABLE 4 – Table de routage du Routeur 1



### Exercice 1

Écrire la table de routage des routeurs 2, 3 ; et celle de la machine d'adresse 192.168.0.1



### Affichage de la table de routage

Sous Windows et linux **netstat -r**

```
IPv4 Table de routage
=====
Routage actif :
Destination réseau  Masque réseau  Adr. passerelle  Adr. interface  Métrique
-----
0.0.0.0            0.0.0.0          192.168.1.254    192.168.1.24    25
127.0.0.0          255.0.0.0        On-link          127.0.0.1       331
127.0.0.1          255.255.255.255  On-link          127.0.0.1       331
127.255.255.255    255.255.255.255  On-link          127.0.0.1       331
192.168.1.0        255.255.255.0    On-link          192.168.1.24    281
192.168.1.24       255.255.255.255  On-link          192.168.1.24    281
192.168.1.255      255.255.255.255  On-link          192.168.1.24    281
224.0.0.0          240.0.0.0        On-link          127.0.0.1       331
224.0.0.0          240.0.0.0        On-link          192.168.1.24    281
255.255.255.255    255.255.255.255  On-link          127.0.0.1       331
255.255.255.255    255.255.255.255  On-link          192.168.1.24    281
=====
```

Remarquer qu'il y a aussi une adresse 127.0.0.0 qui n'est pas vraiment une adresse réseau mais c'est l'adresse de la machine pour elle-même.

On a le protocole pour construire une table de routage mais il faut un protocole pour connaître quel est le meilleur chemin que devra suivre les trames dans un réseau complexe. Pour cela on analyse deux types de protocole : RIP et OSPF.

### 3 RIP (Routing Information Protocol).

**Définition 3** (RIP : Routing Information Protocol)

Routing Information Protocol (RIP, protocole d'information de routage) est un protocole de routage IP de type Vector Distance (à vecteur de distances) s'appuyant sur l'algorithme de détermination des routes décentralisé Bellman-Ford (hors programme). Il permet à chaque routeur de communiquer aux routeurs voisins.

La métrique utilisée est la distance qui sépare un routeur d'un réseau IP déterminé quant au **nombre de sauts** (ou "hops" en anglais).

Pour chaque réseau IP connu, chaque routeur conserve l'adresse du routeur voisin dont la métrique est la plus petite. Ces meilleures routes sont diffusées toutes les 30 secondes.

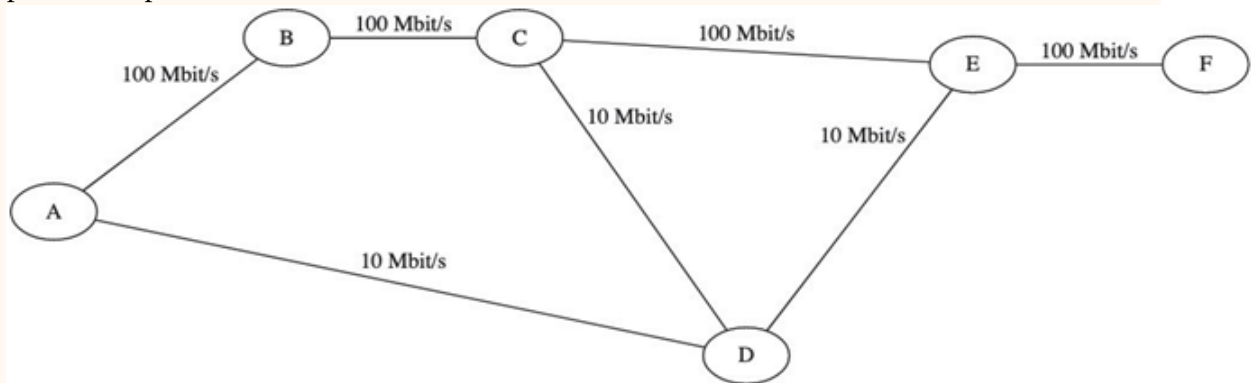
**Vecteur de distance**

Les protocoles de routage à vecteur de distances (distance vector) sont des protocoles permettant de construire des tables de routages où aucun routeur ne possède la vision globale du réseau, la diffusion des routes se faisant de proche en proche. Le terme "vecteur de distances" vient du fait que le protocole manipule des vecteurs (des tableaux) de distances vers les autres noeuds du réseau



### Exemple

On considère le réseau modélisé par le schéma ci-dessous. Les sous-réseaux sont identifiés par les lettres de A à F; les débits des liaisons entre les routeurs sont indiqués sur le schéma. Pour plus de simplification, on assimile un sous-réseau à un routeur.



Si on suppose que tous les routeurs utilisent le protocole *RIP* (distance en nombre de sauts). On s'intéresse aux routes utilisées pour rejoindre E une fois les tables stabilisées.

| Sous-réseau | Prochain saut | Distance |
|-------------|---------------|----------|
| A           | D             | 2        |
| B           | C             | 2        |
| C           | E             | 1        |
| D           | E             | 1        |
| F           | E             | 1        |

TABLE 5 – Table RIP pour routeur E

Le chemin de A à E est alors ADE



### Exercice 2

- Compléter les tables RIP pour atteindre les routeurs A, C et D et F.

| Machine            | Prochain saut | Distance | Machine            | Prochain saut | Distance |
|--------------------|---------------|----------|--------------------|---------------|----------|
| B                  |               |          | A                  |               |          |
| C                  |               |          | B                  |               |          |
| D                  |               |          | D                  |               |          |
| E                  |               |          | E                  |               |          |
| F                  |               |          | F                  |               |          |
| RIP pour routeur A |               |          | RIP pour routeur C |               |          |
| Machine            | Prochain saut | Distance | Machine            | Prochain saut | Distance |
| A                  |               |          | A                  |               |          |
| B                  |               |          | B                  |               |          |
| C                  |               |          | C                  |               |          |
| E                  |               |          | D                  |               |          |
| F                  |               |          | E                  |               |          |
| RIP pour routeur D |               |          | RIP pour routeur F |               |          |

- En déduire les chemins pour aller de C à A, de F à C, de B à D et de A à F;



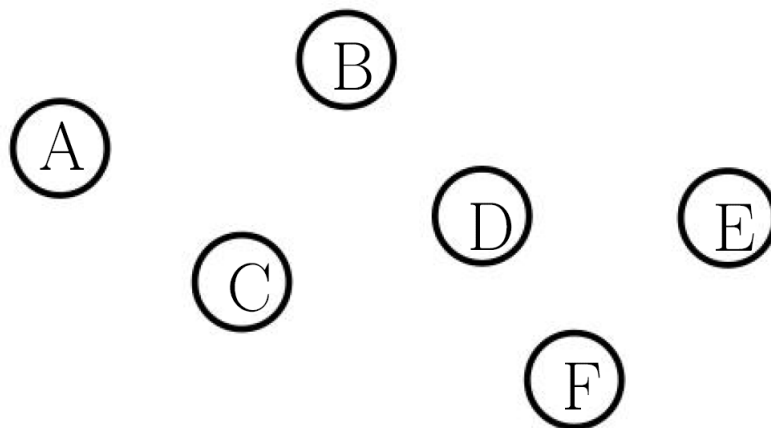
### Exercice 3

1. Un constructeur automobile possède six sites de production qui échangent des documents entre eux. Les sites de production sont reliés entre eux par six routeurs A , B , C, D, E et F On donne ci dessous les tables de routage des routeurs A à F obtenus avec le protocole RIP :

| Routeur A |      | Routeur B |      | Routeur C |      | Routeur D |      | Routeur E |      | Routeur F |      |
|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| Dest      | Pass | Dest      | Pass | Dest      | Pass | Dest      | Pass | Dest      | Pass | Dest      | Pass |
| B         | B    | A         | A    | A         | A    | A         | C    | A         | B    | A         | D    |
| C         | C    | C         | C    | B         | B    | B         | C    | B         | B    | B         | E    |
| D         | C    | D         | C    | D         | D    | C         | C    | C         | B    | C         | D    |
| E         | B    | E         | E    | E         | B    | E         | E    | D         | D    | D         | D    |
| F         | B    | F         | E    | F         | D    | F         | F    | F         | F    | E         | E    |

Déterminer à l'aide de ces tables le chemin emprunté par un paquet de données envoyé du routeur A vers le routeur F.

2. On veut représenter schématiquement le réseau de routeurs à partir des tables de routage. Recopier sur la copie le schéma ci-dessous :



En s'appuyant sur les tables de routage, tracer les liaisons entre les routeurs.



### Exercice 4

Un routeur a la table de routage suivante :

| Adresse de destination | Passerelle    | Interface    | Vecteur de distance |
|------------------------|---------------|--------------|---------------------|
| 112.44.65.20/30        | 112.44.65.23  | 112.44.65.21 | 1                   |
| 86.154.10.0/24         | 86.154.10.254 | 86.154.10.1  | 1                   |
| 62.34.20.0/16          | 112.44.65.23  | 112.44.65.21 | 2                   |
| 94.23.122.0/24         | 86.154.10.254 | 86.154.10.1  | 2                   |
| 87.3.5.0/24            | 112.44.65.23  | 112.44.65.21 | 2                   |
| 37.48.230.0/24         | 86.154.10.254 | 86.154.10.1  | 3                   |
| default                | 86.154.10.254 | 86.154.10.1  | 1                   |

1. Faire le schéma d'un réseau qui peut correspondre à cette table de routage.
2. Donner les exemples d'adresse IP que le routeur peut avoir.



### Remarque

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). De plus, le protocole RIP est limité à 15 sauts (on traverse au maximum 15 routeurs pour atteindre sa destination). On lui préfère donc souvent le protocole OSPF.

## 4 Open Shortest Path First (OSPF)



### RIP vs OSPF

Avec le protocole RIP on a vu que le meilleur chemin de notre réseau pour aller de A à E est ADE. Mais si vous remarquez bien la vitesse du débit sur ce chemin est de 10Mbits/s ce qui est beaucoup moins rapide que si on avait choisit le chemin ABCE où le débit est de 100Mbits/s. Le protocole OSPF est censé corriger ce défaut.

### Définition 4 (protocole OSPF (Open Shortest Path First))

Le protocole OSPF (Open Shortest Path First) est un protocole de routage IP à état de liens s'appuyant sur l'algorithme de Dijkstra afin de déterminer la meilleure route (en terme de débit) permettant d'atteindre la destination.

Dans cette question tous les routeurs utilisent le protocole *OSPF* (distance en coût des routes)

### Définition 5

Le coût d'une liaison est modélisé par la formule

$$\frac{\text{Débit de référence}}{d}$$

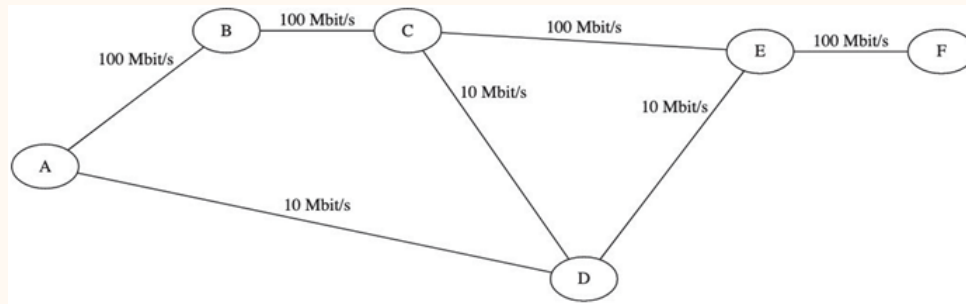
où  $d$  est le débit de cette liaison exprimé en bit par seconde.





### Exemple

On reprend notre exemple précédent :



Si le débit de référence est  $10^8$  bits/s, on calcule le coût pour chaque débit.

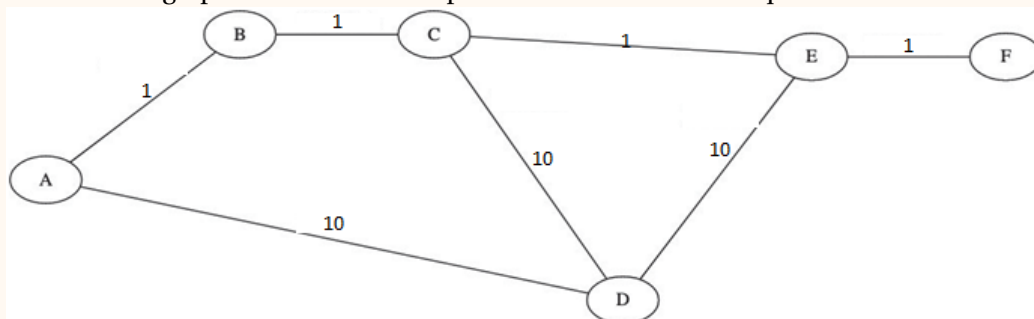


### Remarque

1 megabit =  $10^6$  bits = 1 000 000 bits = 1000 kilobits.

| Débit $d$ bits/s                         | Coût = $\frac{10^8}{d}$           |
|--|-----------------------------------|
| $d = 100\text{Mb/s} = 10^8\text{bits/s}$ | coût = $10^8 \times 10^{-8} = 1$  |
| $d = 10\text{Mb/s} = 10^7\text{bits/s}$  | coût = $10^8 \times 10^{-7} = 10$ |

On a alors le graphe suivant où on représente le coût entre chaque routeur.



La distance entre deux routeurs est la somme minimale des coûts. On s'intéresse aux routes utilisées pour rejoindre E une fois les tables stabilisées.

| Machine | Prochain saut | Distance |
|---------|---------------|----------|
| A       | B             | 3        |
| B       | C             | 2        |
| C       | E             | 1        |
| D       | E             | 10       |
| F       | E             | 1        |

Pour le routage entre A et E : Pour le protocole *RIP* le débit est de 10 Mbits/s

Pour le protocole *OSPF*, le débit est de 100 Mbits/s

Donc le protocole *OSPF* fournit le routage entre A et E le plus performant en terme de débit.

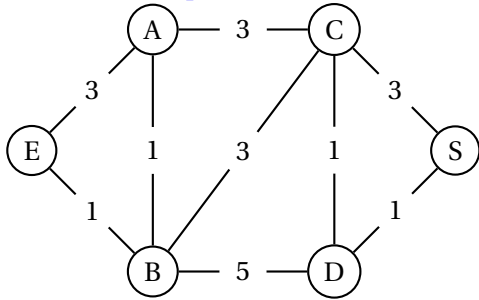
## 5 Algorithme du plus court chemin : Algorithme de Dijkstra

La recherche d'une plus courte chaîne seffectue avec l'algorithme de Dijkstra. Il s'agit d'un algorithme glouton, où l'on fait un choix optimal à chaque étape.

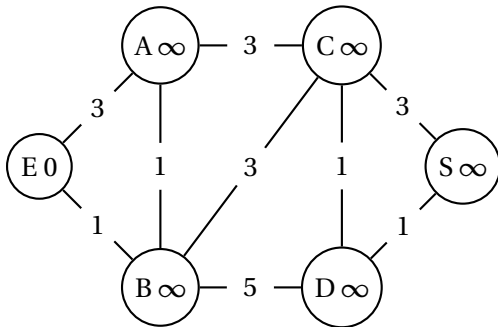
### 5.1 La méthode graphique

Exemple : recherche de la plus courte chaîne du sommet E au sommet S dans le graphe suivant.

[Lien vers le diaporama](#)

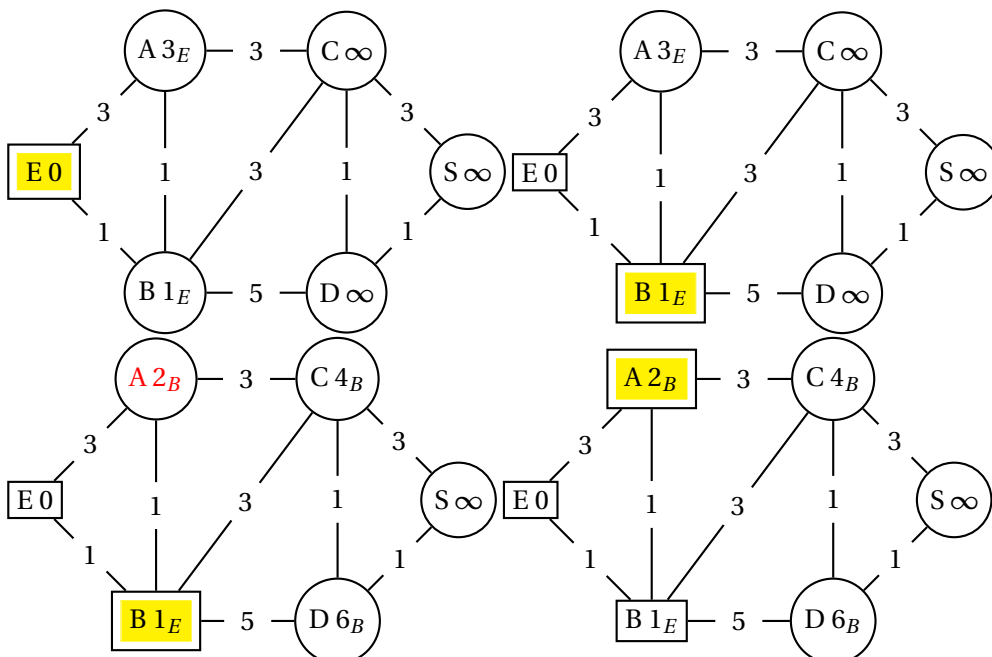


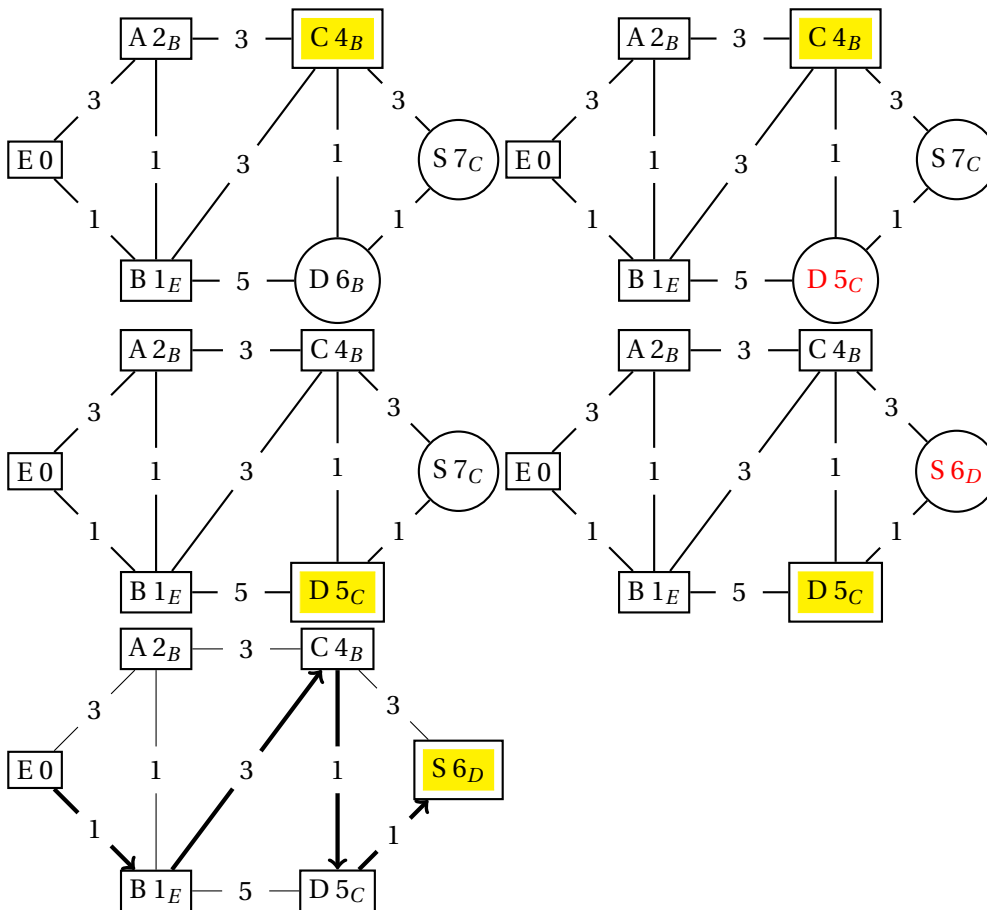
- **Initialisation** : on affecte 0 au sommet de départ E et  $\infty$  aux autres sommets et on sélectionne le sommet de départ.



- **Pour chaque étape** :

- On ajoute à tous les sommets adjacents au sommet sélectionné précédemment le coefficient de chaque arête (à condition que ces sommets n'aient pas déjà été sélectionnés).
- Si le résultat obtenu est inférieur au coefficient actuel, on affecte au sommet adjacent ce nouveau nombre (en notant de quel sommet il provient).
- On répète le processus jusqu'à ce que tous les sommets soient sélectionnés.





Le chemin le plus court est donc E-B-C-D-S de taille 6.

## 5.2 La méthode par tableau

On peut faire une recherche avec un tableau. C'est le plus simple.

| Départ | E | A                                    | B        | C        | D                                    | S                                    | Sommet choisi |
|--------|---|--------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
|        | 0 | $\infty$                             | $\infty$ | $\infty$ | $\infty$                             | $\infty$                             | E             |
| E(0)   |   | $3_E$                                | $1_E$    | $\infty$ | $\infty$                             | $\infty$                             | B (S)         |
| B(1)   |   | <del><math>3_E</math></del><br>$2_B$ |          | $4_B$    | $6_B$                                | $\infty$                             | A (B)         |
| A(2)   |   |                                      |          | $4_B$    | $6_B$                                | $\infty$                             | C(B)          |
| C(4)   |   |                                      |          |          | <del><math>6_B</math></del><br>$5_C$ | $7_C$                                | D (C)         |
| D(5)   |   |                                      |          |          |                                      | <del><math>7_C</math></del><br>$6_D$ | S(D)          |

Le parcours avec un coût minimal pour aller de E à S est donc EBCDS dont le coût est 6.

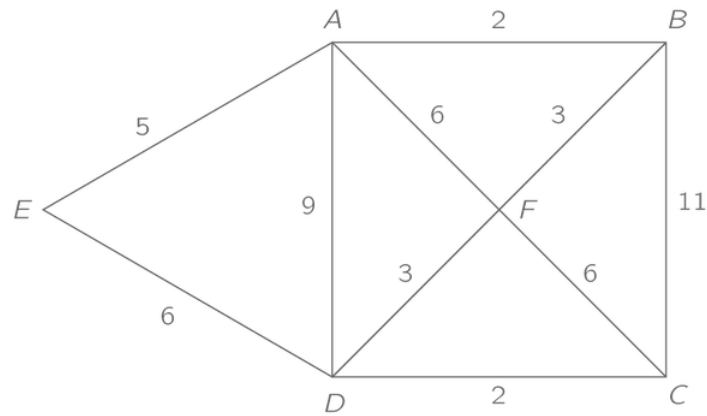
$$E \xrightarrow{1} B \xrightarrow{3} C \xrightarrow{1} D \xrightarrow{1} S$$

Un exemple en vidéo. [L'exemple de la vidéo en pdf.](#)



### Exercice 5

| Voici un graphe pondéré. Proposer un trajet de coût minimum reliant C à A

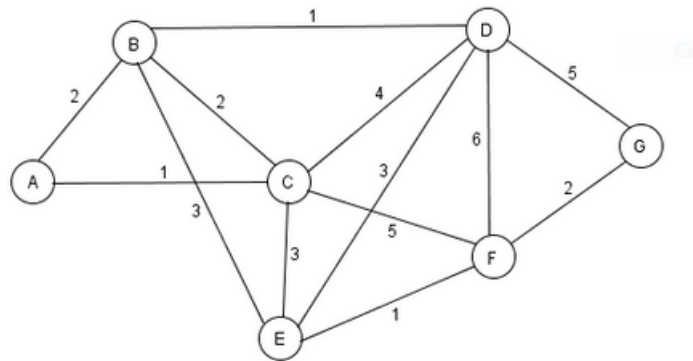


Solution à la fin du diaporama



### Exercice 6

Voici un graphe pondéré. Proposer un trajet de coût minimum reliant A à G



Solution à la fin du diaporama



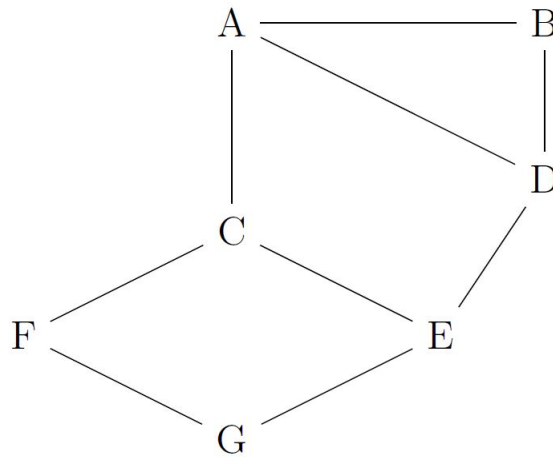
### Complexité

On peut estimer le coût de cet algorithme comme étant de l'ordre de  $n^2$ , une étape par sommet, soit  $n$  étapes, et dans le pire des cas  $n - 1$  opérations par étape pour calculer les distances avec les autres sommets.

## 6 Exercice Type Bac : Réseaux en général et les protocoles RIP et OSPF en particulier

### Le protocole RIP

Le protocole RIP permet de construire les tables de routage des différents routeurs, en indiquant pour chaque routeur la distance, en nombre de sauts, qui le sépare d'un autre routeur.



### Question 1

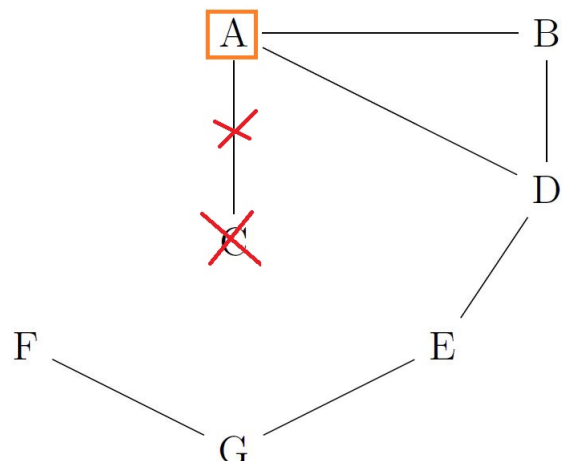
1. Le routeur A doit transmettre un message au routeur G, en effectuant un nombre minimal de sauts. Déterminer le trajet parcouru.
2. Déterminer une table de routage possible pour le routeur G obtenu à l'aide du protocole RIP.

| Table de routage de G |                 |          |
|-----------------------|-----------------|----------|
| Destination           | Routeur Suivant | Distance |
| A                     |                 |          |
| B                     |                 |          |
| C                     |                 |          |
| D                     |                 |          |
| E                     |                 |          |
| F                     |                 |          |

### Question 2

Le routeur C tombe en panne. Reconstruire la table de routage du routeur A en suivant le protocole RIP.

| Table de routage de A |                 |          |
|-----------------------|-----------------|----------|
| Destination           | Routeur Suivant | Distance |
| B                     |                 |          |
| D                     |                 |          |
| E                     |                 |          |
| F                     |                 |          |
| G                     |                 |          |

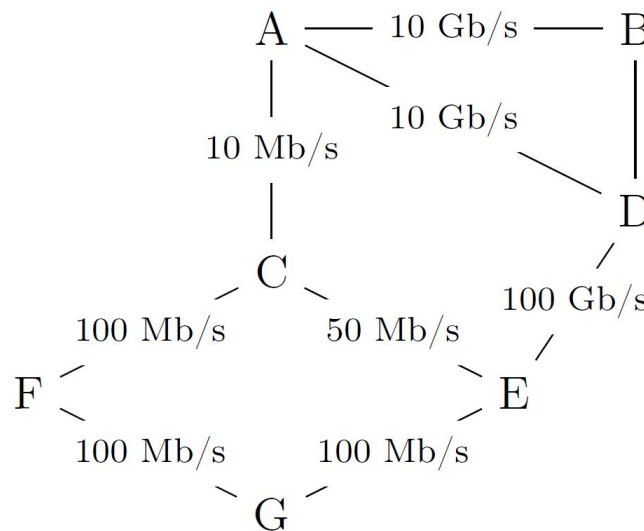


### Le protocole OSPF

Contrairement au protocole RIP, l'objectif n'est plus de minimiser le nombre de routeurs traversés par un paquet. La notion de distance utilisée dans le protocole OSPF est uniquement liée aux coûts des liaisons. L'objectif est alors de minimiser la somme des coûts des liaisons traversées. Le coût d'une liaison est donné par la formule suivante :

$$\text{coût} = \frac{10^8}{d}$$

où  $d$  est la bande passante en bits/s entre les deux routeurs. On a rajouté sur le graphe représentant le réseau précédent les différents débits des liaisons. On rappelle que  $1 \text{ Gb/s} = 1\,000 \text{ Mb/s} = 10^9 \text{ bits/s}$ .

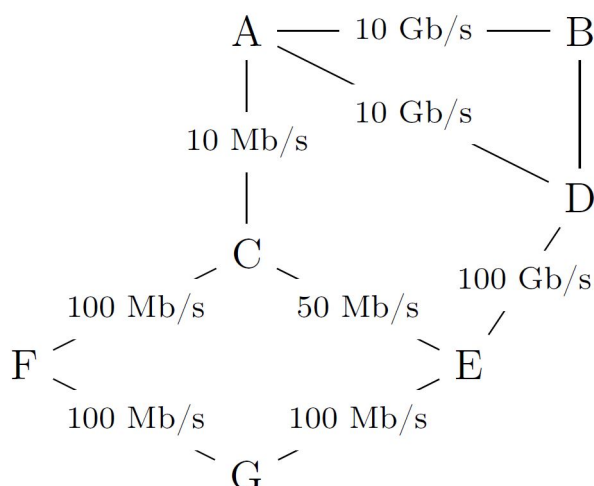


### Question 3

1. Vérifier que le coût de la liaison entre les routeurs A et B est 0,01.
2. La liaison entre le routeur B et D a un coût de 5. Quel est le débit de cette liaison ?

### Question 4

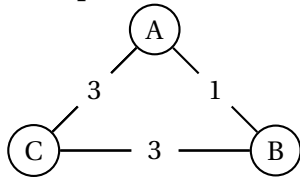
Le routeur A doit transmettre un message au routeur G, en empruntant le chemin dont la somme des coûts sera la plus petite possible. Déterminer le chemin parcouru. Démontrez le résultat avec l'algorithme de Dijkstra.



## 7 Programmons l'algorithme de Dijkstra (Sur Capytale)

On représentera le graphe par un dictionnaire dont les clés seront les sommets et les valeurs seront des listes de couples (sommet adjacent à la clé, distance à la clé).

**Exemple :**



```

graphe={ "A": [ ("B", 1), ("C", 3) ],
         "B": [ ("A", 1), ("C", 3) ],
         "C": [ ("A", 3), ("B", 3) ] }
  
```

Nous aurons besoin d'une fonction **minimum(dico)** qui détermine et renvoie la clé correspondant au minimum des valeurs d'un dictionnaire.

Voici l'algorithme de Dijkstra à coder en python :

---

**Algorithme** algorithme de *dijkstra*

---

**ENTRÉES :** Un graphe G et un sommet s

**SORTIES :** Un dictionnaire D donnant la distance minimale entre s et les autres points du graphe

**procédure** DIJKSTRA(G,s)

  D ← dictionnaire vide

  d ← un dictionnaire dont les clef sont les sommets de G et la valeur l'infini.

  d[s] ← 0

**Tant que** d n'est pas vide **faire**

    k ← minimum(d)

    nb ← nombre de sommets adjacents à k

**Pour** j allant de 0 à nb -1 **faire**

      v,c ← G[k][j]

**Si** v n'est pas dans D **alors**

        d[v] ← min(d[v],d[k]+c)

**Fin Si**

**Fin Pour**

    D[k] ← d[k]

    Supprimer la clef k du dictionnaire d

**Fin Tant que**

**Retourner** D

**Fin procédure**

---

```

from math import inf # permet d'utiliser l'infini

def minimum(dico) :
    pass

#A commenter
def dijkstra(G, s) :
    pass
  
```

---