

Protocoles de routage

I Rappels de première

1) Réseau

Pour bien suivre ce cours, il est nécessaire de maîtriser les bases sur les réseaux (réseau local, adresse IP, adresse réseau ...)

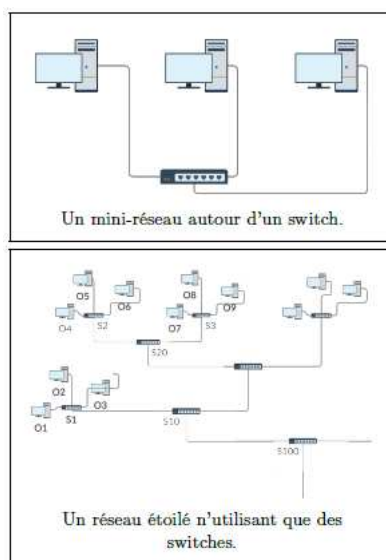
Définition : On appelle réseau un ensemble d'ordinateurs pouvant échanger des informations. On dit que deux ordinateurs qui peuvent échanger des informations sont connectés.

Le dessin ci-dessous illustre un mini-réseau : 3 ordinateurs reliés à un switch.

Dans notre salle info, il y a plusieurs switches donc plusieurs mini-réseaux.

Ces mini-réseaux sont connectés entre eux par l'intermédiaire d'autres switches pouvant former un réseau plus grand.

Des centaines de millions d'ordinateurs sont connectés sur la Toile, comment peut-on se repérer ? Les ordinateurs sont connectés sur des réseaux, et les réseaux sont connectés entre eux.



2) Adresse IP

En cas de panne d'un ordinateur, il faut pouvoir le remplacer par un autre tout en conservant le réseau. Il fallait donc trouver une alternative aux adresses MAC, pour associer une adresse non plus à une machine, mais à une connexion réseau ! Cette nouvelle adresse, c'est la fameuse **adresse IP**.

Attribution d'une adresse IP :

- L'adresse IP est attribuée à tout matériel informatique en connexion avec Internet (routeur, ordinateur, smartphone, modem ADSL ou modem câble, imprimante réseau, etc.)
- Chaque paquet transmis par le protocole IP contient l'adresse IP de l'émetteur ainsi que l'adresse IP du destinataire.

Adresses IPv4/IPv6 :

Les adresses **IPv4** sont constituées de 4 nombres de 1 octet (8 bits). Par exemple, 172.16.252.8 est une adresse IPv4.

Avec ces quatre nombres on peut théoriquement adresser $256 \times 256 \times 256 \times 256 = 4\,294\,967\,296$ machines.

Ce nombre sera bientôt insuffisant (en plus certaines plages d'adresses ne peuvent pas être utilisées) et on passe progressivement en **IPv6** (8 nombres de 2 octets=128 bits) ce qui permettra l'adressage de $3,4 \times 10^{38}$ machines.

Exemple :

b5f1 :4d :452c :58fe :e74 :4712 :A5ff :41ba est une adresse IPv6.

Cette même adresse en décimal est 46577 : 77 : 17708 : 22782 : 3700 : 18194 : 42495 : 16826

Définition : Adresse publique et privée (locale)

- Les adresses IPv4 sont dites **publiques** si elles sont enregistrées et routables sur Internet, elles sont donc **uniques** mondialement.
- les adresses **privées** ne sont utilisables que dans un réseau local, et ne doivent être uniques que dans ce réseau. La traduction d'adresse réseau, réalisée notamment par les box internet, transforme des adresses privées en adresses publiques et permet d'accéder à Internet à partir d'un poste du réseau privé.

Exercice 1

Obtenir l'IP local de ta machine (il s'agit de l'adresse IPv4 pour Internet Protocol) [ici](#)

Obtenir l'IP public de ta machine [ici](#)

Localiser géographiquement ton IP [ici](#) : [ici](#)

☞ Quelques adresses IP sur le réseau local à connaître :

- Une adresse bien utile à connaître pour faire des tests est 127.0.0.1 qui correspond toujours à la machine sur laquelle on travaille.
- L'adresse de type xxx.xxx.xxx.0 est réservée, c'est **l'adresse du réseau local**.
- xxx.xxx.xxx.255 est l'adresse du **broadcast**. Envoyer un paquet (message) à cette adresse, c'est l'envoyer à tous les ordinateurs du réseau.

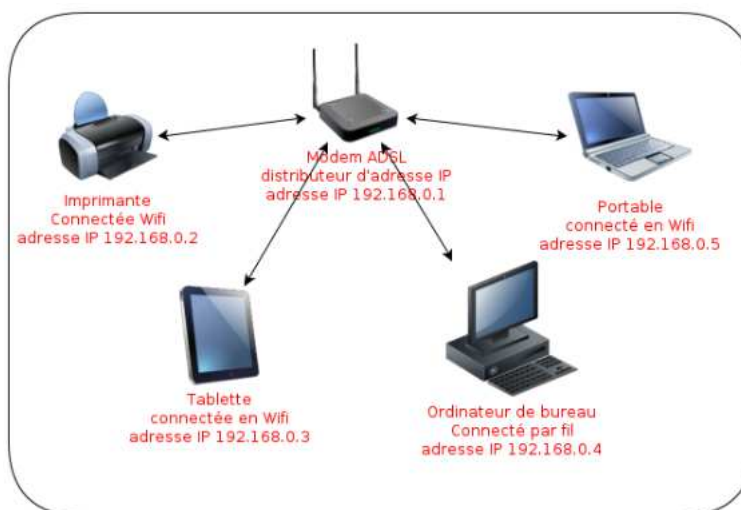
☞ Adressage :

Dans un petit réseau domestique, toutes les adresses IP commencent en général par 192.168.xxx. ('xxx' représente un octet (8 bits) , soit un nombre de 0 à 255)

- xxx.xxx.xxx.xxx : en rouge, c'est le réseau (netID en anglais)
- On peut aussi indiquer le nombre de bits associé au réseau local, ici : xxx.xxx.xxx.xxx/24
- xxx.xxx.xxx.xxx : en rouge, c'est le numéro de l'ordinateur (appelé adresse de l'hôte, hostID en anglais)
- xxx.xxx.xxx.xxx : c'est l'adresse IP (adresse du réseau + adresse de l'hôte)

Exercice 2 :

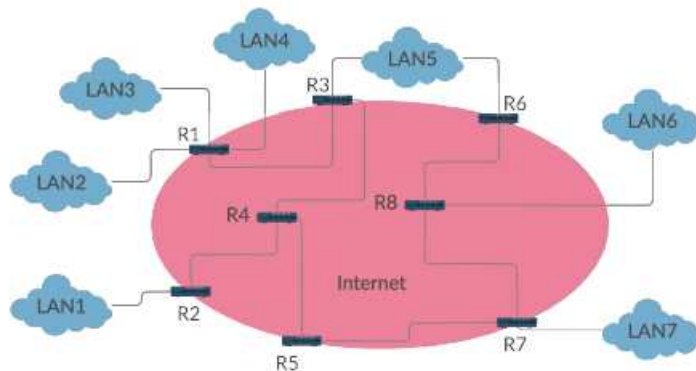
Sur l'exemple ci-dessus, distingue le netID et le hostID de chaque matériel informatique.



3) Routeur

Définition : Un routeur **gère** les communications entre plusieurs **sous-réseaux** par la connaissance de leurs adresses IP. La R-distance entre deux éléments E1 et E2 du réseau est le plus petit nombre de routeurs qu'il faut traverser pour aller de E1 à E2. Les éléments à R-distance 0 d'un routeur forment un réseau appelé voisinage immédiat du routeur.

Dans le dessin ci-dessous, qui représente une petite partie d'Internet, les petites boîtes symbolisent des routeurs, et les petits nuages représentent des sous-réseaux dont on suppose qu'ils sont faits d'ordinateurs et de switches uniquement.



☞ Notre réseau local est connecté avec tous les autres réseaux d'Internet par l'intermédiaire de routeurs. Chaque routeur possède sa propre adresse et connaît l'adresse de ses voisins (mais pas de l'ensemble des routeurs du monde évidemment, cela en ferait trop ...)

Exercice 3 : Sous PowerShell

1. Taper `tracert google.fr` (ou `tracert` sous Linux).
2. Analyse les adresses retournées, le nombre de routeurs traversés.

☞ Une passerelle désigne le plus souvent le modem-routeur ou la box qui permet de relier un réseau local au réseau Internet. Une passerelle a une adresse IP permettant au réseau local de se relier avec internet. Lors de la création de ton mini réseau, tu dois configurer la passerelle par défaut lui permettant d'accéder au réseau internet.

Définition : Un masque de sous-réseau a la même forme que l'adresse IP : `xxx.xxx.xxx.xxx`. Il est constitué d'une suite de « 1 » suivi d'une suite de « 0 ».

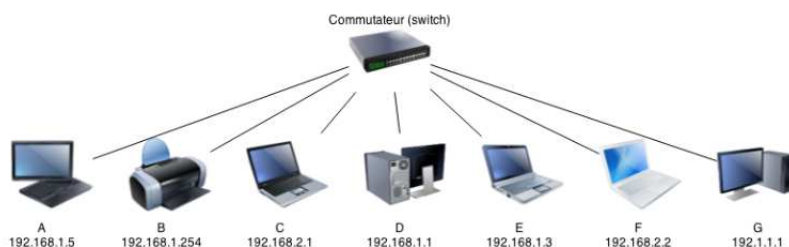
Il permet de découper l'adresse IP en 2 parties :

- La partie réseau (netID) qui correspond aux bits de poids forts
- La partie « machine » (hostID) qui correspond aux bits de poids faibles

L'adresse du sous-réseau correspondant à une IP s'obtient en faisant un « ET » bit à bit entre le masque et l'IP.

En gros le masque correspond aux premiers bits du réseau local

Exercice 4 : Sur ce réseau le masque est `255.255.255.0`, il concerne donc les 24 premiers bits. Quels sont les équipements qui communiquent entre eux ? Quels sont ceux qui ne font pas partie du réseau local principal ? Quel est l'adresse de ce réseau local ?



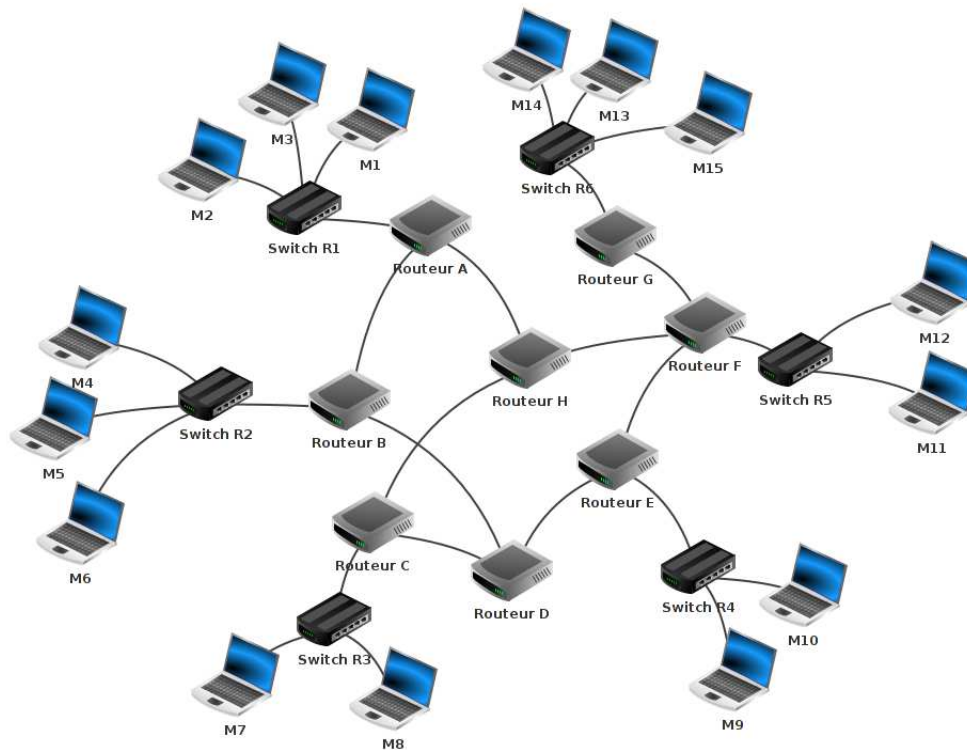
☞ Le masque n'est pas toujours un nombre entier d'octets (8,16,24 bits ...)

Par exemple ici, pour indiquer que le masque correspond aux 21 premiers bits de poids forts on peut écrire l'IP comme cela : 192.168.129.10/21

Le masque est 11111111.11111111.1111000.00000000 ce qui correspond à 255.255.248.0

II Chacun sa route, chacun son chemin ...

Les réseaux locaux sont reliés entre eux par l'intermédiaire de routeurs. Il ne faut jamais perdre de vue qu'Internet résulte de l'interconnexion de réseaux par des routeurs.



plusieurs réseaux locaux reliés entre eux

☞ Nous avons sur ce schéma les éléments suivants :

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

Définition : Un routeur permet de relier ensemble plusieurs réseaux locaux. Un routeur est composé d'un nombre plus ou moins important d'interfaces réseau (cartes réseau).

☞ N'importe quel ordinateur peut jouer le rôle de routeur (à partir du moment où il possède au moins 2 interfaces réseau), mais on rencontre souvent des « machines » dédiées (par exemple de marque CISCO)



routeur de marque CISCO

Dans notre schéma, nous avons 6 réseaux locaux, chaque réseau local possède son propre switch.

- réseau local 1 : M1, M2 et M3
- réseau local 2 : M4, M5 et M6

Exercice 5 : Complète la liste ci-dessus avec les réseaux locaux 3, 4, 5 et 6

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 tu l'as 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.

Un chemin peut être plus rapide qu'un autre. Mais le fait d'avoir plusieurs chemins permet d'en changer si un routeur a un problème technique .

Exercice 6 : Détermine un chemin possible permettant d'établir une connexion entre la machine M4 et M14.

III Table de routage

1) Le problème

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

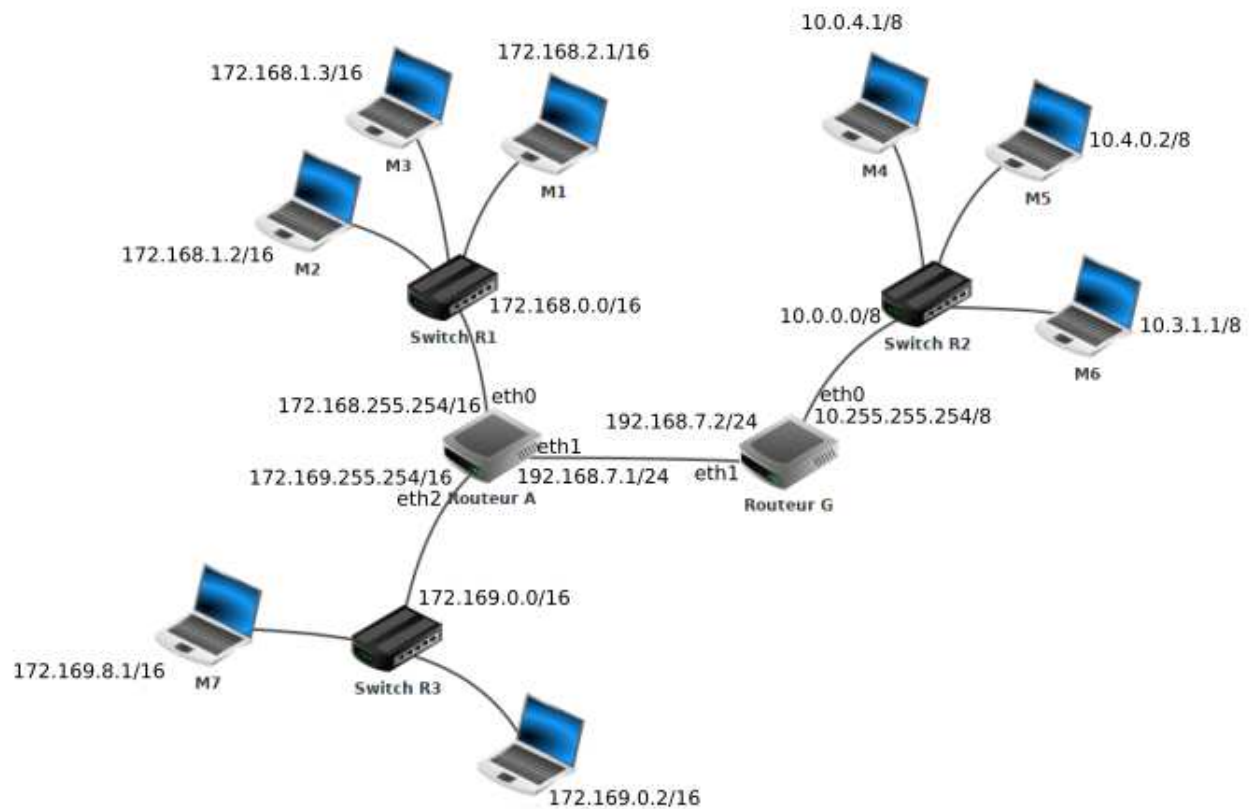
Nous avons vu l'année dernière que 2 machines appartenant au même réseau local doivent avoir la même adresse réseau.

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 ?

2) Un exemple vaut mieux qu'un long discours

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



Exercice 7 : Étudie attentivement le schéma ci-dessus. Le choix des adresses IP des machines a été fait au « hasard » (ne cherche pas une signification là où il n'y en a pas). En revanche, vérifie que tout est cohérent : adresses machines avec adresses réseaux (les adresses réseaux sont notées à côté des différents switch (par exemple le switch R1 est utilisé dans le réseau d'adresse 172.168.0.0/16)).

Définition : Comment lire la table de routage d'un routeur

- **Destination :** l'adresse IP de la destination (réseau, routeur ...)
- **Passerelle :** C'est l'IP de l'interface d'entrée du routeur suivant. Si la destination est un réseau directement lié à l'interface, on ne met rien ou on met le routeur lui-même.
- **Interface :** c'est l'IP de l'interface de sortie du routeur qu'on utilise
- **Métrique :** Cela représente la « distance » pour atteindre la destination. (par exemple le nombre de sauts (routeurs), ou le coût lié à l'état des connexions et au débit)

Table de routage d'un routeur A

Destination	Passerelle	Interface	Métrique
Adresse 1	Routeur suivant 1	Interface 1	2
Adresse 2	Routeur suivant 2	Interface 2	3
Adresse 3	Routeur suivant 3	Interface 1	1
défaut	Routeur par défaut	Interface par défaut	1(toujours)

Remarque : Dans les exemples qui vont suivre la métrique correspondra au nombre de sauts (nombre de routeurs traversés) pour atteindre la destination.

Si on ne connaît pas l'adresse de destination, on va à l'adresse par défaut. On lui met une métrique de 1

👉 **Exemple de table de routage :**

- le routeur A qui possède 3 **interfaces réseau** que l'on nomme eth0, eth1 et eth2. Les adresses IP liées à ces interfaces réseau sont : 172.168.255.254/16 (eth0), 172.169.255.254/16 (eth2) et 192.168.7.1/24 (eth1)
- le routeur G qui possède 2 interfaces réseau que l'on nomme eth0 et eth1. Les adresses IP liées à ces interfaces réseau sont : 10.255.255.254/8 (eth0) et 192.168.7.2/24 (eth1)

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 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 est directement relié au réseau 172.169.0.0/16 par l'intermédiaire de son interface eth2
- 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 la table de routage de A :

Table de routage d'un routeur A

Destination	Passerelle	Interface	Métrique
172.168.0.0/16	Rien ou (A eth0)	172.168.255.254/16	0
192.168.7.0/24	Rien ou (A eth1)	192.168.7.1/24	0
172.169.0.0/16	Rien ou (A eth2)	172.169.255.254/16	0
10.0.0.0/8	192.168.7.2/24	192.168.7.1/24	1

On peut simplifier en nommant les réseaux ou routeurs à la place des IP. Quelquefois la colonne Interface n'apparaît pas.

Table de routage d'un routeur A

Destination	Passerelle	Interface	Métrique
Réseau R1		eth0	0
Réseau (A et G)		eth1	0
Réseau R3		eth2	0
Réseau R2	Routeur G	eth1	1

Remarque : Suivant les sources (livres, sites etc), la métrique peut avoir comme valeur minimum 1, lorsque le réseau est lié au routeur de départ. Ici j'ai choisi 0 ...

On peut traduire ce tableau par :

- pour atteindre le réseau R1, on doit « sortir » du routeur par eth0 (le réseau R1 est directement relié au routeur A)
- pour atteindre le réseau R3, on doit « sortir » du routeur par eth2 (le réseau R3 est directement relié au routeur A)
- pour atteindre le routeur G, on doit « sortir » du routeur par eth1 (le routeur G est directement relié au routeur A)
- pour atteindre le réseau R2, 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)

Exercice 8 : Détermine la table de routage du routeur G. Mettre les réseaux directement accessibles (adjacents) et les réseaux R3 et R1

☞ 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.

3) 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

1) Encore des graphes !

Un réseau de réseaux comportant des routeurs peut être modélisé par un graphe :

- chaque routeur est un sommet
- 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*).

2) Le protocole RIP

Définition : Principe du protocole RIP

- **Au départ**, les tables de routage contiennent uniquement les réseaux qui sont directement reliés au routeur (dans notre exemple ci-dessus, à l'origine, la table de routage de A contient uniquement les réseaux 172.168.0.0/16, 192.168.7.0/24 et 172.169.0.0/16).
- **Chaque routeur** envoie **périodiquement** (toutes les 30 secondes) à tous ses voisins (routeurs adjacents) un message. Ce message contient la liste de tous les réseaux qu'il connaît (dans l'exemple ci-dessus, le routeur A envoie un message au routeur G avec les informations suivantes : « je connais les réseaux 172.168.0.0/16, 192.168.7.0/24 et 172.169.0.0/16 »).
De la même manière G envoie un message à A avec les informations suivantes : « je connais les réseaux 192.168.7.0/24 et 10.0.0.0/8 »).
- **À la fin de cet échange**, les routeurs mettent à jour leur table de routage avec les informations reçues (dans l'exemple ci-dessus, le routeur A va pouvoir ajouter le réseau 10.0.0.0/8 à sa table de routage. Le routeur A « sait » maintenant qu'un paquet à destination du réseau 10.0.0.0/8 devra transiter par le routeur G). Pour renseigner la colonne « métrique », le protocole utilise le nombre de sauts, autrement dit, le nombre de routeurs qui doivent être traversés pour atteindre le réseau cible (dans la table de routage de A, on aura donc une métrique de 1 pour le réseau 10.0.0.0/8 car depuis A il est nécessaire de traverser le routeur G pour atteindre le réseau 10.0.0.0/8)
- **Lors de la mise à jour**, si une destination est déjà dans la table, on choisit la route correspondant à la métrique la plus petite.

Le protocole RIP s'appuie sur l'algorithme de Bellman-Ford (algorithme qui permet de calculer les plus courts chemins dans un graphe).

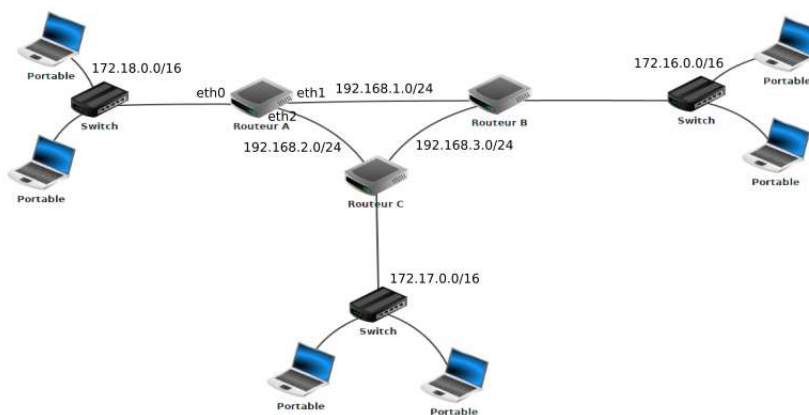
Inconvénients de ce protocole :

- 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.

Exercice 9 : A partir du schéma ci-dessous et en te basant sur le protocole RIP (métrique = nombre de sauts), détermine la table de routage du routeur A (utilise la version simplifiée avec les lettres et sans la colonne Interface. Seuls les IP des réseaux sont sur le schéma)

Quel est, d'après la table de routage construite ci-dessus, le chemin qui sera emprunté par un paquet pour aller d'une machine ayant pour adresse IP 172.18.1.1/16 à une machine ayant pour adresse IP 172.16.5.3/16 ?



3) Le protocole OSPF

Comme dans le cas du protocole RIP, nous allons retrouver des échanges d'informations entre les routeurs (ces échanges sont plus "intelligents" dans le cas d'OSPF, ils permettent donc de réduire l'occupation du réseau).

Nous n'allons pas rentrer dans les détails de ces échanges et nous allons principalement insister sur la métrique produite par OSPF. Le protocole OSPF, au contraire de RIP, n'utilise pas le "nombre de sauts nécessaire" pour établir la métrique, mais la notion de « **coût des routes** ».

Dans les messages échangés par les routeurs on trouve le coût de chaque liaison (plus le coût est grand et moins la liaison est intéressante). Quand on parle de "liaison" on parle simplement du câble qui relie un routeur à un autre routeur. Le protocole OSPF permet de connaître le coût de chaque liaison entre routeurs, et donc, de connaître le coût d'une route (en ajoutant le coût de chaque liaison traversée). On notera que pour effectuer ces calculs, le protocole OSPF s'appuie sur l'**algorithme de Dijkstra**.

Mais sur quoi repose cette notion de coût ?

La notion de coût est directement liée au débit des liaisons entre les routeurs. Le débit correspond au nombre de bits de données qu'il est possible de faire passer dans un réseau par seconde.

☞ Le débit est donné en bits par seconde (bps), mais on trouve souvent des kilo bits par seconde (kbps) ou encore des méga bits par seconde (Mbps) $\Rightarrow 1 \text{ kbps} = 1000 \text{ bps}$ et $1 \text{ Mbps} = 1000 \text{ kbps}$.

Définition :

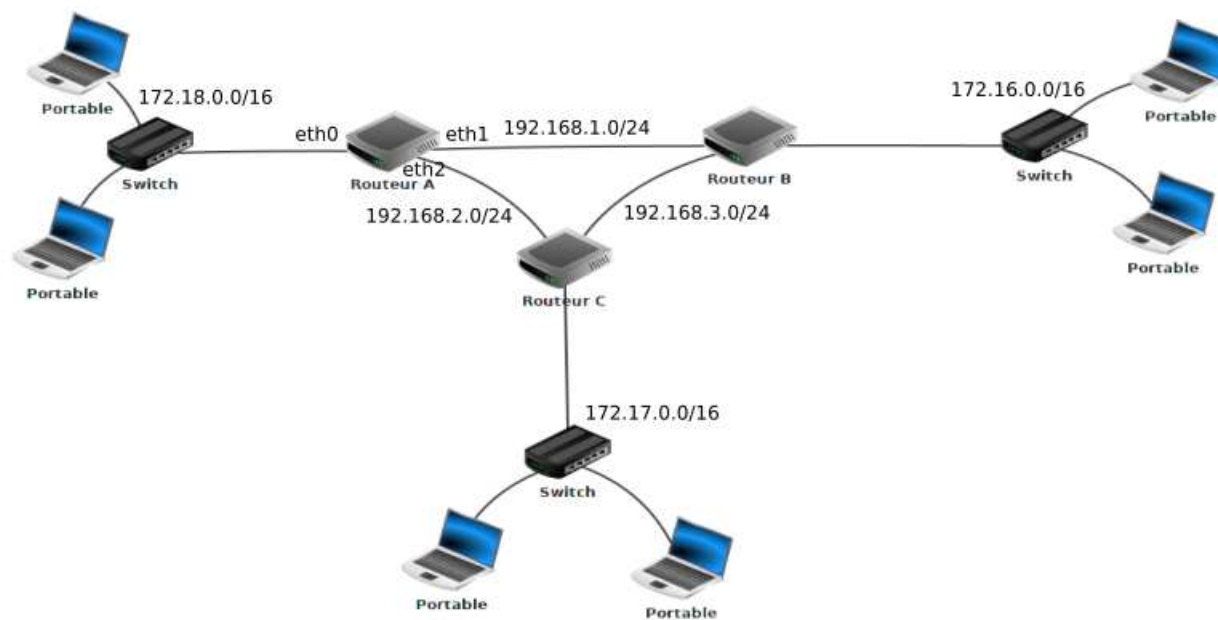
Connaissant le débit d'une liaison, il est possible de calculer le coût d'une liaison à l'aide de la formule suivante :

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

(le débit est en bits par seconde)

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.



Exercice 10 : En te basant sur le réseau ci-dessus et sur le protocole OSPF (métrique = somme des coûts), détermine la table de routage du routeur A

Données : On donne les débits suivants :

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

Exercice 11 : Quel est, d'après la table de routage construite ci-dessus, le chemin qui sera emprunté par un paquet pour aller d'une machine ayant pour adresse IP 172.18.1.1/16 à une machine ayant pour adresse IP 172.16.5.3/16 ?