

1 Adressage IP

1.1 Limites du nombre d'adresses IP

1.1.1 Adresses de réseaux valides

Les adresses IP de réseaux **valides** appartiennent forcément aux classes A, B ou C. Elles satisfont en outre les contraintes suivantes :

- Partie *id. réseau* :
 - ⬆ ne peut pas être "tout à zéro" (c'est à dire tous ses bits à 0)
 - ⬆ ne peut pas être "tout à un" pour la classe A
- Partie *id. station* :
 - ⬆ doit être "tout à zéro"

Exercice 1 (Nombre d'adresses de réseau)

Pour chaque classe A, B et C, calculer le nombre d'adresses IP de réseaux valides attribuables.

1.1.2 Adresses de stations valides

Exercice 2 (Nombre d'adresses de station)

Toute adresse IP de station **valide**, quelle que soit la classe de son réseau d'appartenance, a sa partie *id. station* qui satisfait les contraintes suivantes :

- ne peut pas être "tout à zéro" (réservé pour l'adresse de son réseau)
- ne peut pas être "tout à un" (réservé pour l'adresse de diffusion générale sur son réseau)

Pour chaque classe A, B et C, calculer le nombre d'adresses IP de stations valides attribuables par réseau.

1.2 Analyse d'adresses IP

Exercice 3 (Adresses IP sous forme binaire)

Soient les 4 adresses IP suivantes, codées sur 32 bits, où les bits sont regroupés ici en octets pour en faciliter la lecture :

1. 10010011 11011000 01100111 10111110

2. 01101100 10100100 10010101 11000101
3. 11100000 10000001 10100010 01010001
4. 11010110 01011100 10110100 11010001

Pour chaque adresse :

- a) L'écrire en notation décimale pointée.
- b) Déterminer sa classe à partir de la représentation binaire.
- c) Isoler sa partie *classe* + *id. réseau* de sa partie *id. station* **si cela a un sens**, et déterminer l'écriture binaire de l'adresse de son réseau d'appartenance (appelée aussi "*son adresse de réseau*").
- d) Écrire son adresse de réseau en notation décimale pointée.

Exercice 4 (Adresses IP en notation décimale pointée)

Soient les 4 adresses IP suivantes, exprimées selon la notation décimale pointée :

1. 139.124.5.25
2. 194.199.116.255
3. 12.34.56.78
4. 224.0.0.2

Pour chaque adresse :

- a) Écrire en binaire sur un octet, le nombre de gauche de l'adresse (jusqu'au premier point).
- b) Les bits codant la classe de l'adresse sont contenus dans cet octet, quelque soit la classe de l'adresse. En déduire sa classe.
- c) Selon que la classe est A, B ou C, la partie *id. station* correspond respectivement aux 3 derniers, 2 derniers ou au dernier octet de l'adresse. En déduire son adresse de réseau en notation décimale pointée sans transformer l'écriture en binaire.

Exercice 5 (Classes et intervalles du premier octet)

On sait que le premier octet d'une adresse IP suffit à déterminer la classe de cette adresse. On sait aussi que certaines combinaisons pour l'*id. réseau* sont interdites.

1. Déterminer, pour chaque classe, l'intervalle $[min, max]$ des valeurs décimales que peut prendre le premier octet, en tenant compte des combinaisons interdites.
2. En déduire les classes des adresses dont le premier octet est :
 - a) 10
 - b) 241
 - c) 192
 - d) 172
 - e) 230

1.3 Adresses IP privées

Certaines adresses sont réservées à un usage particulier (réseaux privés). Elles sont utilisables localement dans un réseau mais ne doivent pas circuler sur Internet et sont rejetées par les routeurs. Elles ne sont donc attribuables à aucun réseau ni aucune station pour se relier à Internet. Ces adresses s'étendent sur les plages suivantes :

- 10.0.0.0 à 10.255.255.255
- 172.16.0.0 à 172.31.255.255
- 192.168.0.0 à 192.168.255.255
- 169.254.0.0 à 169.254.255.255

Exercice 6 (Réajustement du nombre d'adresses réseau)

Reprendre les résultats obtenus à l'exercice 1 et recalculer le nombre d'adresses réseaux attribuables en tenant compte de ces contraintes supplémentaires.

2 Routage IP sans masque de sous-réseaux

Nous allons étudier le principe du routage effectué sur les premiers réseaux TCP/IP.

Le routage est une opération de la couche réseau qui permet d'acheminer un message vers une destination donnée. Sur TCP/IP, le routage est effectué par IP (Internet Protocol) dont le rôle est de permettre l'interconnexion de réseaux hétérogènes.

À l'origine, le routage d'IP reposait uniquement sur les adresses IP et leurs classes. C'est ce que nous allons étudier ici. Dans la section suivante, nous étudierons un principe plus souple utilisant des masques de sous-réseaux et permettant le *subnetting*.

2.1 Brefs rappels sur le routage IP

Une station (ou un routeur) raccordée à un réseau physique ne peut émettre des trames ou des paquets que dans ce réseau (physique). Tout message destiné à l'extérieur de ce réseau doit forcément passer par un ou plusieurs routeurs, qui seront chargés d'acheminer le message vers sa destination.

Le premier routeur de la route est forcément un routeur raccordé à un même réseau que la station émettrice. Il est choisi par celle-ci, en fonction de la destination du message. Si la destination se trouve sur un même réseau que ce routeur, alors celui-ci peut lui envoyer directement le message dans une trame (ou un paquet, ou tout autre PDU que le réseau physique permet d'envoyer pour transporter de l'information).

Par la suite, on simplifiera en considérant que dans un réseau physique on utilise des trames pour transporter des données. . .

Sinon, le routeur doit choisir un second routeur, raccordé à un même réseau et lui envoyer le message dans une trame, afin qu'il l'achemine vers sa destination. Le processus se poursuit jusqu'à ce que le message arrive à un routeur se trouvant sur un même réseau que la destination, qui peut le lui envoyer directement, encapsulé dans une trame.

Une station ou un routeur a donc deux choix de remise de message :

- **la remise directe** : la destination se trouve sur un même réseau et le message est encapsulé dans une trame qui lui est directement destinée ;
- **la remise indirecte** : la destination ne se trouve pas sur un même réseau, et le message doit être encapsulé dans une trame adressée à un routeur menant vers cette destination. Bien entendu, le routeur choisi est raccordé à un même réseau que la station ou le routeur émettant la trame.

2.2 Test de l'appartenance à un même réseau

À l'origine d'IP, l'analyse de la destination d'un datagramme est très simple et repose uniquement sur le schéma des adresses IP et de leurs classes. En effet, tout réseau physique disposait d'une adresse IP, unique, appartenant à une classe correspondant à la taille de ce réseau, ainsi que nous l'avons étudié précédemment. L'administrateur d'un réseau disposait de tous les bits de l'identifiant de station de cette adresse pour attribuer un adresse IP unique à chaque station et routeur du réseau.

Dans ce contexte, sachant l'adresse IP d'une station, il est aisé d'extraire l'adresse IP du réseau auquel elle appartient. Il suffit d'en identifier la classe et de mettre à zéro tous les bits de la partie identifiant de station.

Sauf cas exceptionnels et de courte durée, toute station (ou routeur) connaît son (ou ses) adresse(s) IP ainsi que les adresses du (ou des) réseaux au(x)quel(s) elle est connectée. Lorsqu'elle a un datagramme à envoyer (ou, pour un routeur, à acheminer), il lui suffit d'extraire l'adresse de réseau de l'adresse destination du datagramme et de la comparer à ses propres adresses de réseau. S'il y a concordance, la destination est directement accessible et la remise est directe. Sinon, il faut choisir un routeur parmi ceux directement accessibles, et s'en servir de relais.

Ce choix est réalisé, dans toutes les implémentations IP, par consultation d'une table de routage.

Exercice 7 (Test de la remise directe)

Soit un routeur comportant 3 interfaces d'adresses 194.199.110.250, 27.158.62.10 et 139.124.5.250. Est-ce que les destinations suivantes lui sont directement accessibles :

1. 27.5.12.198 ?
2. 194.199.115.5 ?
3. 194.199.110.5 ?

2.3 Principe des tables de routage

Toute station et tout routeur d'un réseau TCP/IP dispose de sa propre table de routage, l'informant sur les destinations accessibles.

Les tables de routage d'origine comportent au minimum deux colonnes et chaque ligne décrit une destination. La première colonne indique l'adresse IP du réseau destination et la seconde indique l'adresse IP du routeur menant vers la destination. Le routeur ayant plusieurs adresses IP, celle retenue doit être celle dans le réseau commun avec la station (ou le routeur).

Par souci de lisibilité lors de la consultation des tables de routages par les administrateurs réseau, les destinations directement accessibles figurent elles aussi dans les tables. Comme il n'y pas de routeur pour ces destinations, l'adresse IP spécifiée dans la colonne routeur est 0.0.0.0 (sous Unix, car sur Windows, c'est l'adresse IP

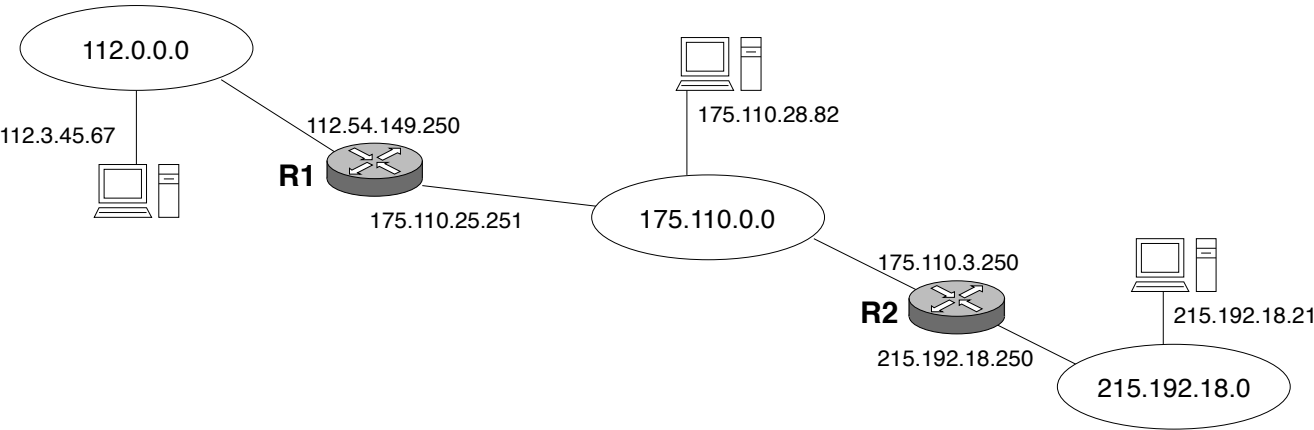
de l’interface d’accès au réseau correspondant), indiquant l’ordinateur possédant la table, c’est à dire une remise directe.

Enfin, il est à noter qu’une table de routage ne décrit pas la route qui sera suivie par un datagramme. Elle n’en indique qu’une partie : l’adresse du prochain routeur à utiliser. La table de ce routeur indiquera une autre partie de la route : l’adresse d’un autre routeur à utiliser, en cas de remise indirecte.

— Ainsi, l’information sur les routes est répartie entre les différentes tables des routeurs de l’internet.

Exemple

Soit l’interconnexion de réseaux suivante :



La table de routage de la station 112 . 3 . 45 . 67 peut être la suivante :

Destination	Routeur
112 . 0 . 0 . 0	0 . 0 . 0 . 0
175 . 110 . 0 . 0	112 . 54 . 149 . 250
215 . 192 . 18 . 0	112 . 54 . 149 . 250

Celle du routeur R1 peut être :

Destination	Routeur
112 . 0 . 0 . 0	0 . 0 . 0 . 0
175 . 110 . 0 . 0	0 . 0 . 0 . 0
215 . 192 . 18 . 0	175 . 110 . 3 . 250

Si la station 112 . 3 . 45 . 67 émet un datagramme à destination de 215 . 192 . 18 . 21, alors elle enverra une trame à R1 (112 . 54 . 149 . 250). Celui-ci enverra une autre trame à R2 (175 . 110 . 3 . 250) qui, à son tour, émettra une trame à destination de 215 . 192 . 18 . 21 (remise directe).

□

Exercice 8 (Table de routage de R2)

Écrire la table de routage de R2.

2.4 Route par défaut

Bien souvent, les stations connectées à Internet n'ont qu'un seul routeur à disposition. Tous les datagrammes émis par une telle station, à destination de l'extérieur de son réseau passent par le routeur du réseau. Ainsi, toutes les entrées de sa table de routage, sauf celle de la remise directe, indiquent la même adresse de routeur, comme c'est le cas pour la station 112.3.45.67. Pour les stations du réseau 112.0.0.0, R1 joue le rôle de **routeur par défaut**. Peu importe la destination, elles doivent passer par lui.

C'est pourquoi, IP accepte la spécification d'une **route par défaut**. Elle est employée lorsqu'aucune entrée correspondant à la destination d'un datagramme n'est trouvée dans la table. Elle indique un routeur directement accessible.

Bien que ne pouvant faire l'objet d'une entrée dans la table de routage (dans cette version), la route par défaut apparaît lorsqu'on la visualise (de même que les destinations directement accessibles). En utilisant une route par défaut, la visualisation de la table de 112.3.45.67 donnerait :

Destination	Routeur
112.0.0.0	0.0.0.0
default	112.54.149.250

Notons qu'aucun de ces enregistrements ne fait, à proprement parler, partie de la table de routage. Ils sont tous issus de la configuration de l'interface de raccordement au réseau 112.0.0.0 et celle du logiciel IP. Nous verrons dans la partie 3 qu'avec une colonne supplémentaire, ces enregistrements peuvent être exprimés dans la table.

Les avantages de la route par défaut sont multiples :

- le nombre d'entrées des tables peut être considérablement réduit : de plusieurs millions à une seule ;
- les évolutions de l'Internet extérieures à l'environnement d'une station utilisant une route par défaut nécessitent rarement la mise à jour de sa table de routage, voire jamais si elle ne dispose que d'un routeur. Sans route par défaut, tout rajout ou suppression de réseau dans l'Internet doit donner lieu à une mise à jour de la table.

Mais il y a aussi les inconvénients suivants :

- des datagrammes dont la destination ne correspond à aucun réseau peuvent se trouver à boucler entre des routeurs utilisant des routes par défaut, jusqu'à ce que leur TTL arrive à 0, ce qui est très inefficace ;
- on ne peut plus interdire les communications avec des réseaux sans utiliser de firewall (logiciel actif sur un routeur, filtrant les datagrammes passant par lui) ou d'autres facilités. En effet, sans route par défaut, tous les réseaux qui ne sont pas mentionnés dans la table de routage ne peuvent être atteints. La communication avec les stations de ces réseaux est donc impossible. Cela peut s'avérer pratique pour sécuriser des ordinateurs. En présence de route par défaut, ce n'est pas possible de cette façon.

Notons tout de même qu'il est aisé sur Unix d'exprimer des destinations interdites dans les tables de routages en utilisant l'option **reject** de la commande **route**. Mais les administrateurs réseau préféreront utiliser un firewall plutôt que cette possibilité. . .

Exercice 9 (Tables avec route par défaut)

1. Écrire la visualisation de la table de routage de la station 215.192.18.21.

2. Écrire celle de 175.110.28.82 sachant que l'on ne veut pas qu'elle puisse communiquer avec les stations du réseau 112.0.0.0.

2.5 Route vers un ordinateur

IP permet aussi d'indiquer des routes pour des ordinateurs au lieu de réseaux. Cela permet de limiter les communications à ces ordinateurs au lieu de les permettre pour l'ensemble des ordinateurs de leurs réseaux, et ajoute de la sécurité.

C'est une configuration de IP et non une entrée de la table (dans cette version), qui ne concerne que des adresses de réseaux distants. Elle apparaît toutefois lors de la visualisation de la table, où l'entrée indique l'adresse IP de l'ordinateur.

Exercice 10 (Ajout d'une route vers un ordinateur)

En fait, 175.110.28.82 a quand même le droit de communiquer avec la station 112.3.45.67. Écrire la visualisation de sa table de routage.

2.6 Algorithme de routage

D'après ce qui a été dit jusqu'à présent, l'algorithme de routage d'origine d'IP, utilisé par toute station ou routeur devant envoyer un datagramme est le suivant :

```

                                Routage (Datagramme, Table)

Extraire D, l'adresse IP de destination du Datagramme
Calculer N, l'adresse IP du réseau de D
Si N est un réseau directement accessible
Alors
    Envoyer le Datagramme à D, directement,
    en l'encapsulant dans une trame de ce réseau
Sinon
    Si il existe une route explicite vers D
    Alors
        Transmettre le datagramme au routeur précisé dans la route
    Sinon
        Si la table de routage contient une route pour le réseau N
        Alors
            Transmettre le datagramme au routeur précisé dans la route
        Sinon
            Si il existe une route par défaut
            Alors
                Transmettre le datagramme au routeur précisé dans la route
            Sinon
                Signaler une erreur avec ICMP et détruire le Datagramme
        FinSi
    FinSi
FinSi
FinSi
FinSi
```

Que le datagramme soit transmis à un routeur ou à la destination finale, il est toujours encapsulé dans une trame ou un paquet. Cette trame est envoyée à l'adresse physique du routeur ou de la destination finale, correspondant à l'adresse de son interface sur le réseau utilisé. Celle-ci est déterminée en effectuant une résolution d'adresse, à partir de l'adresse IP du destinataire de la trame. ARP et le cache ARP sont une possibilité pour cela.

Exercice 11 (Adresses physiques et adresses IP)

Supposons que les trois réseaux de la figure précédente soient trois réseaux Ethernet. Les adresses des interfaces des stations et routeurs, ainsi que leurs adresses IP associées sont les suivantes :

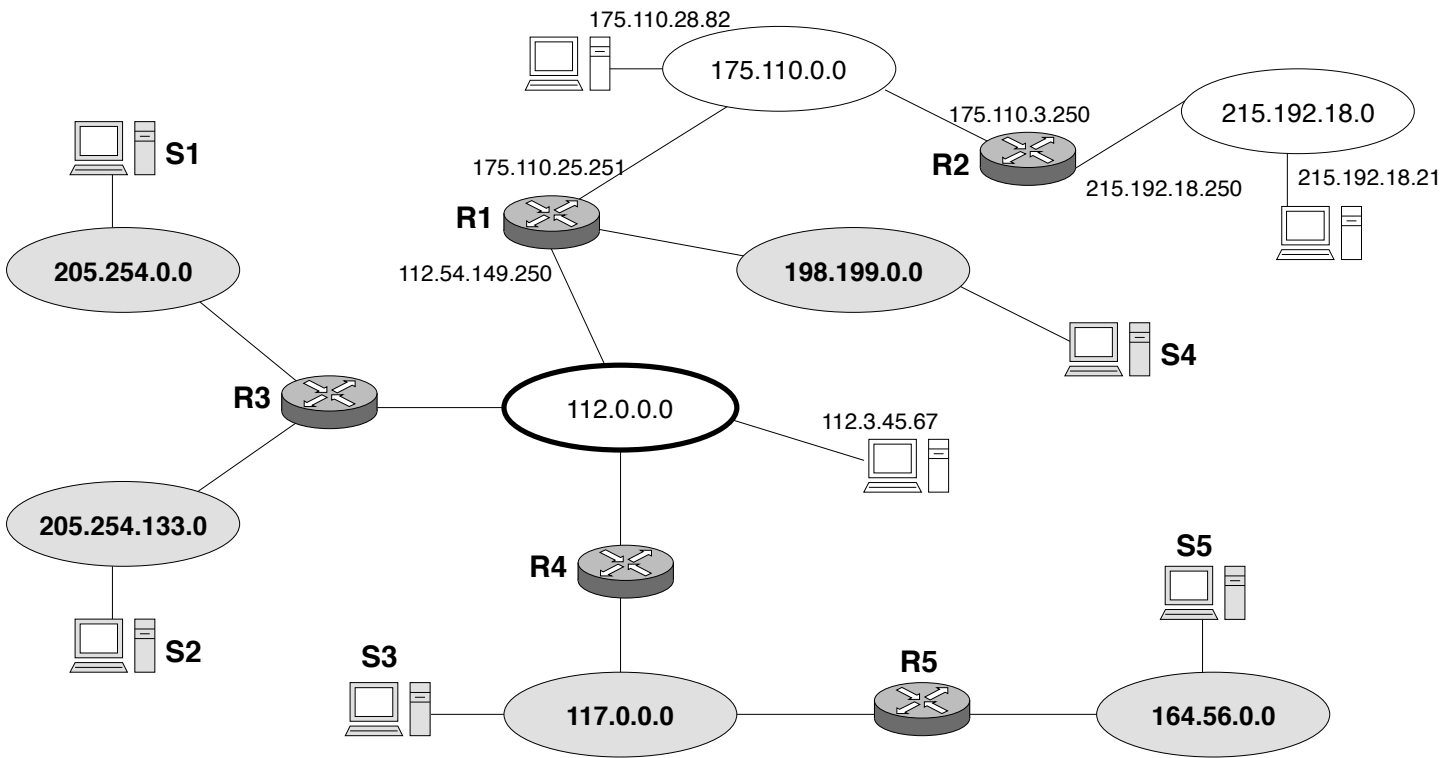
Adresse IP	Adresse Physique
112.3.45.67	08:00:57:f5:8d:01
112.54.149.250	08:00:57:f5:8d:02
175.110.3.250	08:00:57:f5:8d:03
175.110.25.251	08:00:57:f5:8d:04
175.110.28.82	08:00:57:f5:8d:05
215.192.18.21	08:00:57:f5:8d:06
215.192.18.250	08:00:57:f5:8d:07

Trois trames (hors celles transportant des éventuels datagrammes ARP) sont nécessaires pour acheminer un datagramme émis par la station 112.3.45.67 à destination de 215.192.18.21. Pour les deux premières, indiquer :

- leurs adresses physiques (MAC) source et destination
- les adresses source et destination contenues dans le datagramme qu’elles encapsulent

Exercice 12 (Extension du réseau)

Le réseau précédent a évolué. De nouveaux réseaux et stations (figurant en gris sur la figure) et les routeurs R3, R4 et R5 ont été ajoutés :



1. Attribuer à chaque nouvelle station la plus petite adresse IP disponible dans son réseau.
2. Attribuer à chaque interface des nouveaux routeurs (ou nouvelles interfaces d'anciens routeurs), la plus grande adresse IP disponible dans son réseau. Si plusieurs routeurs sont connectés à un même réseau, attribuer la plus grande adresse au routeur portant le plus grand numéro.
3. Écrire les tables de routage des stations S1, S4 et S5 ainsi que celle de 175.110.28.82. Utiliser autant que possible des routes par défaut.
4. On va écrire les tables de routage de certains routeurs. Là encore, on va utiliser des routes par défaut lorsque c'est possible. Cependant, il faut s'assurer de la cohérence des routes car toutes les destinations doivent être accessibles à partir de n'importe quel routeur/station. Les routeurs ne doivent pas se renvoyer un datagramme à cause de tables mal élaborées. De plus, les datagrammes dont l'adresse destination n'appartient pas à une adresse de réseau existante doivent être rapidement identifiés et détruits. Une solution pour cela est d'utiliser un réseau fédérateur (*backbone*, ou *épine dorsale*), central, contenant au moins un routeur ayant connaissance de l'ensemble du réseau et n'utilisant pas de route par défaut. Les autres routeurs n'ont qu'à connaître les destinations non situées vers le réseau fédérateur et utiliser une route par défaut pour les autres. Un réseau fédérateur adéquat est celui au trait épais (112.0.0.0). Bien qu'il soit préférable que tous les routeurs du réseau fédérateur aient connaissance de l'ensemble du réseau, on suppose que R3 a une route par défaut vers R4 et que R4 a une route par défaut vers R1. Écrire les tables de routage des routeurs R1, R3, R4 et R5.

3 Routage et sous-réseaux

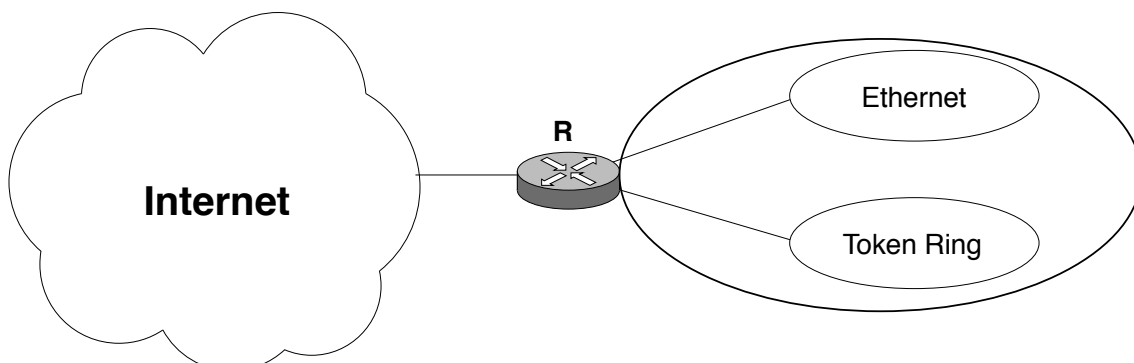
Dans cette section, nous allons utiliser le routage avec masques de sous-réseaux, qui est le plus utilisé actuellement. Ce type de routage est dû à la technique du *subnetting*.

3.1 Rappels sur le subnetting

Le subnetting est une technique qui permet d'attribuer une seule adresse de réseau à plusieurs réseaux physiques, gérés par une seule organisation. Ceci est contradictoire avec le schéma d'adressage d'origine de IP, où une adresse de réseau devait correspondre à un seul réseau physique. Les adresses de réseau étaient utilisées pour savoir si deux stations étaient raccordées au même réseau et servaient comme entrées des tables de routage.

Prenons l'exemple d'une entreprise qui possède deux réseaux locaux (un réseau *Ethernet* et un *Token Ring*) et qui désire les interconnecter entre eux ainsi qu'à l'Internet.

La solution la plus simple consiste à utiliser un routeur qui servira aussi bien pour les communications internes à l'entreprise que pour les communications avec l'Internet. Ainsi, le schéma d'interconnexion est le suivant :



Les avantages d'utiliser une seule adresse de réseau pour ces deux réseaux sont nombreux mais le principal est que le réseau de l'entreprise est vu de l'extérieur (c'est à dire de l'Internet) comme un unique réseau. Outre une certaine confidentialité organisationnelle, cela permet de minimiser les informations de routage pour atteindre un de ces deux réseaux : seule la route vers le réseau (global) de l'entreprise doit être connue dans l'Internet.

- **C'est principalement pour minimiser la taille des tables de routage, et réduire le nombre d'adresses réseaux nécessaires aux entreprises que le *subnetting* a été inventé.**

Nombre d'entreprises disposent de plusieurs réseaux physiques. Si chacun possédait une adresse de réseau propre, le nombre d'entrées des tables de routage serait multiplié, alors qu'il se limite généralement à une entrée par entreprise connectée.

3.2 Adresses de sous-réseaux

En fait, si les deux réseaux physiques partagent la même adresse de réseau, **ils ont chacun une adresse de sous-réseau qui leur est propre**. Ces adresses leur sont attribuées par l'administrateur réseau de l'entreprise et n'ont aucun intérêt du point de vue de l'Internet. Leur connaissance est uniquement nécessaire localement pour router les datagrammes au sein de l'entreprise.

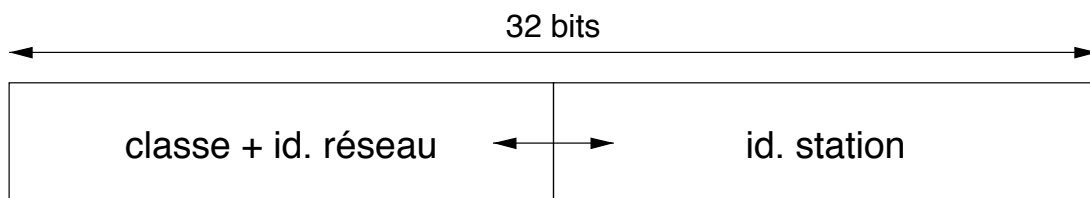
C'est un autre avantage du *subnetting* : l'administrateur de ce réseau peut l'organiser à sa guise et attribuer comme bon lui semble les adresses de sous-réseaux, tant que ces attributions sont connues localement.

- **En conséquence, le réseau de l'entreprise peut évoluer sans qu'aucune allocation d'adresse ni mise à jour des tables de routage ne soit nécessaire au sein de l'Internet.**

L'ajout et la suppression d'un réseau dans l'entreprise sont uniquement pris en compte localement, à un coût minimum, sans avoir besoin de changer d'adresse de réseau, ni d'ajouter ou de supprimer des routes dans les tables de l'Internet.

3.3 Attribution des adresses de sous-réseaux

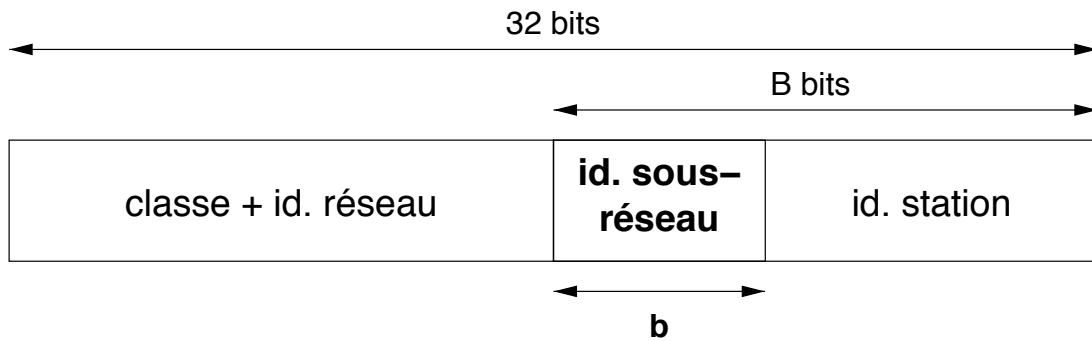
Pour comprendre comment les (sous-)réseaux de l'entreprise peuvent se voir attribuer des adresses de sous-réseaux, il faut regarder la forme générale d'une adresse IP. Celle-ci est composée d'une partie *classe + identifiant de réseau* et d'une partie *identifiant de station*. Leur taille varie selon la classe de l'adresse :



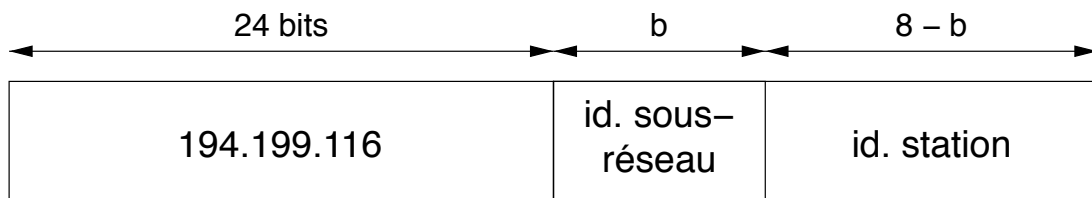
La partie *classe + identifiant de réseau* est fixée et attribuée par les instances officielles de l'Internet. En revanche, l'administrateur du réseau peut gérer à sa guise la partie *identifiant de station*. Posons B le nombre de bits de cette partie. L'administrateur doit partitionner (découper) les 2^B adresses en autant de parties distinctes que de sous-réseaux.

3.3.1 Identifiant de sous-réseau et partition

La solution est très simple. Sur ces B bits, l'administrateur doit réserver b bits pour identifier les sous-réseaux, et introduire un *identifiant de sous-réseau*, comme suit :



En reprenant l'exemple de notre entreprise, supposons qu'elle ait obtenu l'adresse 194.199.116.0, de classe C, pour l'ensemble de son réseau. Dans cette adresse, la partie *identifiant de station* occupe 8 bits (B vaut 8). L'administrateur doit réserver une partie de ces 8 bits pour coder l'*identifiant de sous-réseau* :



Les différentes valeurs de cet identifiant permettront alors de distinguer les sous-réseaux de l'entreprise ; chaque sous-réseau ayant une valeur d'*identifiant de sous-réseau* propre. Dit autrement, elles partitionnent (découpent) l'espace d'adressage.

3.3.2 Recommandations du standard

Le nombre de bits réservés à l'*identifiant de sous-réseau* dépend du nombre de sous-réseaux : s'il y a n sous-réseaux, alors le nombre de bits nécessaires est le plus petit b tel que :

$$n \leq 2^b - 2$$

La soustraction $2^b - 2$ de la formule est due à la recommandation du standard décrivant le subnetting (RFC 1122) selon laquelle les combinaisons "tout à 0" et "tout à 1" pour les bits de l'*identifiant de sous-réseau* ne doivent pas être attribuées à un sous-réseau. Ceci pour éviter les ambiguïtés.

Puisque b bits sont réservés sur les B bits disponibles, il ne reste que $B - b$ bits pour l'identifiant de station.

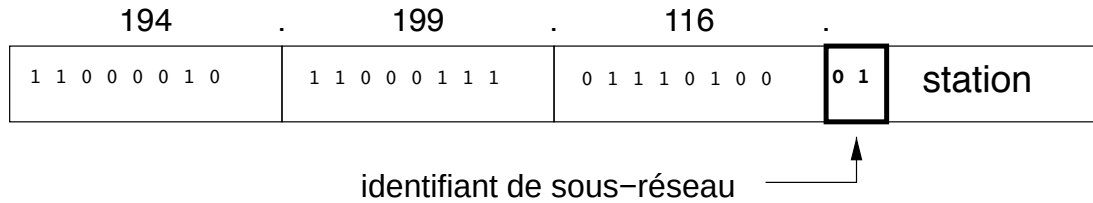
De même qu'en l'absence de *subnetting*, les identifiants de station "tout à 0" et "tout à 1" sont réservés pour l'adresse du (sous-)réseau et l'adresse de diffusion dans le (sous-)réseau.

Le nombre maximal de stations par sous-réseau sera donc de $2^{B-b} - 2$

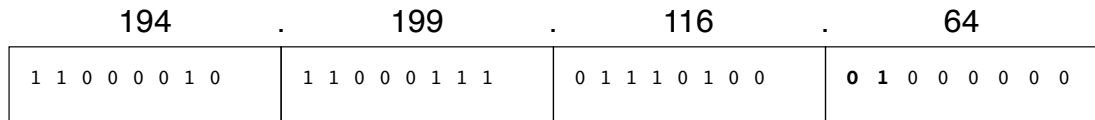
Exemple

Revenons à notre exemple. B vaut 8 et il y a 2 sous-réseaux. On en déduit que la taille de l'*identifiant de sous-réseau* doit être au minimum de 2 bits. Au passage, on en déduit que les sous-réseaux ne doivent pas posséder plus de 62 stations ($2^{8-2} - 2$). Les combinaisons possibles sur 2 bits sont 00, 01, 10 et 11. La première et la dernière ne sont pas exploitables à cause de la recommandation. Les 2 combinaisons restantes vont servir à identifier les sous-réseaux. Par exemple :

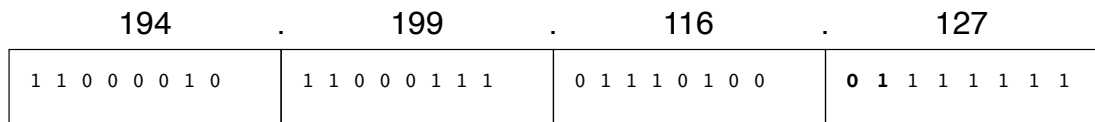
- 01 pour le sous-réseau Ethernet :



- ⇧ L'adresse de ce sous-réseau est obtenue en mettant l'identifiant de station tout à 0, ce qui donne 194.199.116.64 :



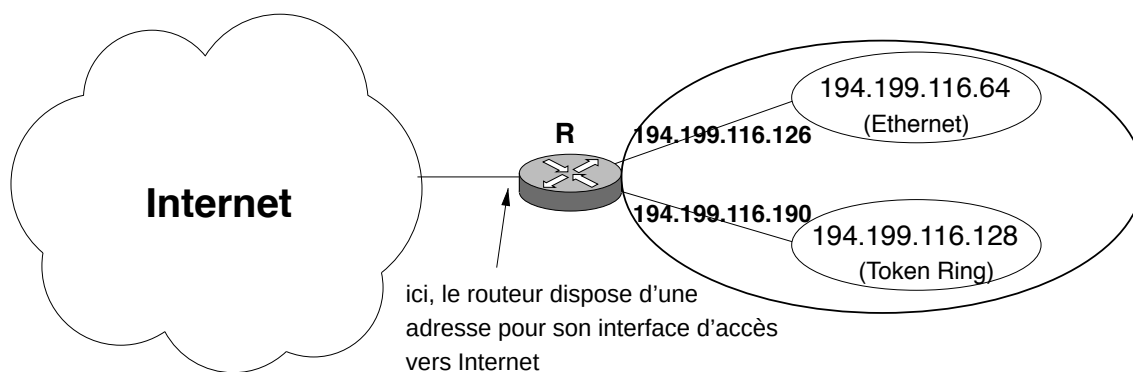
- ⇧ L'adresse de diffusion dans ce sous-réseau est obtenue en mettant l'identifiant de station tout à 1, ce qui donne 194.199.116.127 :



- ⇧ Les 62 adresses possibles pour ses stations vont de 194.199.116.65 à 194.199.116.126.

Notons au passage que le routeur R doit avoir une adresse IP dans chaque sous-réseau, ainsi qu'une adresse IP pour l'interface le reliant à l'Internet.

Si l'on prend les plus hautes disponibles dans les sous-réseaux pour les attribuer au routeur, cela donne :



La raison pour laquelle le standard recommande de ne pas utiliser les identifiants de sous-réseau tout à 0 et tout à 1 est l'ambiguïté que cela introduit :

- l'adresse du sous-réseau ayant l'identifiant de sous-réseau tout à 0 serait la même que l'adresse du réseau (global) de l'entreprise ;
- l'adresse de diffusion dans le sous-réseau ayant l'identifiant de sous-réseau tout à 1 serait la même que l'adresse de diffusion dans le réseau (global) de l'entreprise.

Exercice 13 (Espace d'adressage pour le subnetting dans la classe C)

Compléter le tableau suivant qui explore les possibilités de subnetting d'un réseau de classe C, selon le nombre de bits utilisés pour l'identifiant de sous-réseau, indiqué en première colonne.

Les autres colonnes se déduisent de la première :

- la seconde indique le nombre maximum de sous-réseaux possibles, en tenant compte des recommandations ;
- la troisième indique le nombre maximum de stations par sous-réseau, en tenant compte des recommandations ;
- la quatrième indique le nombre total d'adresses qui ne peuvent plus être attribuées à une station alors qu'elles le pouvaient sans subnetting.

Nb de bits de l'identifiant sous-réseau	Nb max de sous-réseaux	Nb max de stations par sous-réseau	Nb d'adresses de stations perdues
2	2	62	130
3	...	...	...
4	...	...	...
5	...	...	...
6	...	...	...
7	126	0	254

Les réseaux locaux contenant souvent une centaine de stations, il est évident qu'une adresse de classe C n'est pas pertinente pour le subnetting. Même si l'entreprise a de petits réseaux locaux d'une trentaine de postes, le nombre de sous-réseaux possibles est aussi faible que les perspectives d'évolution que cela offre.

C'est pourquoi, **ce sont des adresses de réseau de classe B qui sont généralement utilisées**. Si l'on construit le même tableau sur les possibilités de subnetting pour une adresse de classe B, on s'aperçoit qu'on minimise le nombre d'adresses perdues en utilisant 8 bits pour l'identifiant sous-réseau, ce qui laisse le même espace d'adressage qu'une classe C pour les stations des sous-réseaux :

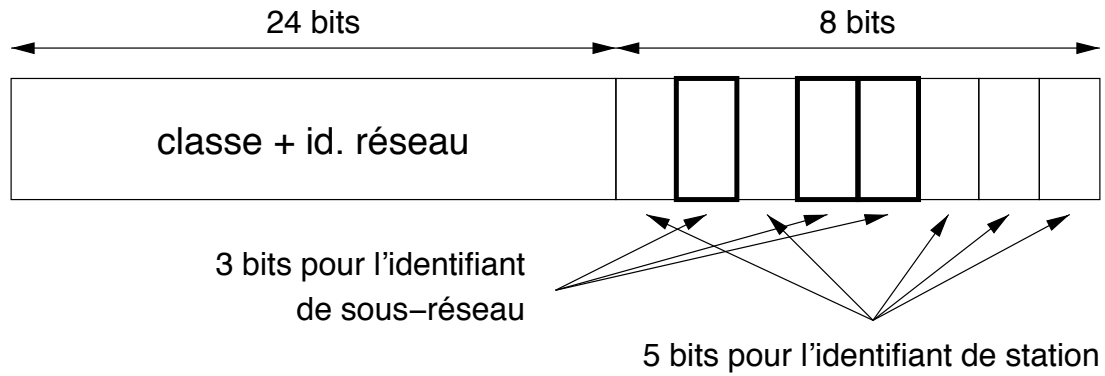
Nb de bits de l'identifiant sous-réseau	Nb max de sous-réseaux	Nb max de stations par sous-réseau	Nb d'adresses de stations perdues
2	2	16 382	32 770
3	6	8 190	16 394
4	14	4 094	8 218
5	30	2 046	4 154
6	62	1 022	2 170
7	126	510	1 274
8	254	254	1 018
9	510	126	1 274
10	1 022	62	2 170
11	2 046	30	4 154
12	4 094	14	8 218
13	8 190	6	16 394
14	16 382	2	32 770
15	32 766	0	65 534

La plupart des entreprises utilisent donc 8 bits pour l'identifiant sous-réseau car cela permet d'adresser de nombreux sous-réseaux de taille raisonnable. Mais nombreuses sont celles qui n'ont qu'une trentaine de sous-réseaux au plus et qui gâchent ainsi un espace d'adressage considérable en monopolisant pour rien plus de 57 000 adresses ! Heureusement, la technique du CIDR (*Classless Inter-Domain Routing*, ou adressage hors-classe) a été inventée depuis.

i Dans la pratique, certains administrateurs ne respectent pas les recommandations pour l'identifiant de sous-réseau tout à 0 et tout à 1, à cause du gâchis d'adresses que cela introduit. La RFC 1878 suggère même que c'est une pratique obsolète. Avec une bonne configuration, les routeurs CISCO s'en accommodent. Néanmoins, nous respecterons cette recommandation, sauf éventuellement dans certains exercices où ce sera précisé.

3.3.3 Identifiant de sous-réseau "éclaté"

La partie *identifiant de sous-réseau* n'est pas obligatoirement constituée de bits tous contigus (collés les uns aux autres). Grâce au masque de sous-réseau que nous étudierons un peu plus loin, les bits qu'elle inclut peuvent se trouver disséminés n'importe où, tant qu'ils sont "empruntés" à la partie *identifiant de station* de l'adresse du réseau de l'entreprise. Ceci est illustré par le schéma suivant (non à l'échelle), où trois bits sont utilisés pour partitionner l'adresse de notre réseau :



3.4 Test d'appartenance à un même sous-réseau

Du point de vue de l'Internet, les sous-réseaux sont inconnus. Seul le réseau logique global auxquels ils appartiennent doit être connu. En revenant à notre exemple, les adresses des sous-réseaux Ethernet et Token Ring sont inconnus mais celle du réseau logique 194.199.116.0 doit l'être.

Tout datagramme destiné à une station d'un sous-réseau est considéré comme étant destiné à une station du réseau logique. Charge au routeur du réseau de distinguer à quel sous-réseau appartient la station. Ainsi, pour l'Internet, l'algorithme de routage reste inchangé car toutes les adresses de 194.199.116.0 à 194.199.116.255 sont considérées comme faisant partie du réseau 194.199.116.0: **les 8 bits de l'identifiant station sont mis à zéro.**

À l'intérieur du réseau, il est capital que chaque station et chaque routeur sache qu'il y a eu partition car elles doivent connaître les routes vers les sous-réseaux et savoir si la remise peut être directe. Il n'est plus possible d'utiliser le test d'appartenance vu en début de TP, car les bits qui identifient le sous-réseau sont plus nombreux que ceux identifiant le réseau (les 24 premiers pour une classe C). En effet, **les bits qui identifient le sous-réseau sont ceux de l'identifiant réseau plus ceux de l'identifiant sous-réseau.**

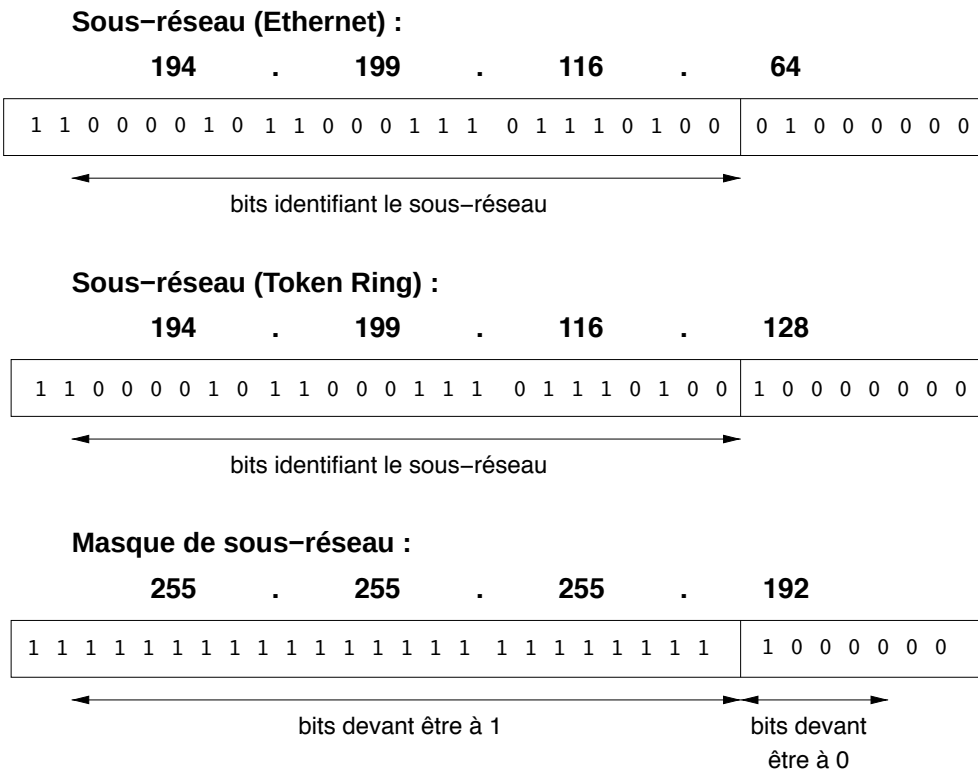
3.4.1 Masques de sous-réseaux

Il faut donc que les stations sachent quels sont les bits identifiant le sous-réseau. Une solution simple et élégante est d’associer à chaque adresse de sous-réseau, un **masque de sous-réseaux**. Il est constitué de 32 bits et est souvent représenté en notation décimale pointée.

La construction du masque est simple : mettre à 1 tous les bits qui identifient le sous-réseau et à 0 les bits identifiant les stations. Pour notre exemple, en gardant l’identifiant de sous-réseau sur 2 bits proposés dans la section 3.3.2, les associations sont les suivantes :

Sous-réseau	Masque
194.199.116.64	255.255.255.192
194.199.116.128	255.255.255.192

Graphiquement, voici les adresses et le masque (commun) :



Exercice 14 (Détermination de masques de sous-réseau)

En utilisant le **plus petit nombre de bits** possibles pour l'identifiant de sous-réseau et en suivant les recommandations du standard :

1. Quel est le masque de sous-réseaux pour le sous réseau 194.199.116.0/25
2. Quel est le masque de sous-réseaux une adresse de classe C.

3.4.2 Utilisation des masques

Lorsqu'une station (ou un routeur) est reliée à un sous-réseau, **le masque de sous réseau doit être indiqué au moment de la configuration de son interface, en même temps que son adresse IP**. Avec ce masque et l'adresse de son sous-réseau, il est aisé de savoir si la remise d'un datagramme doit être directe ou indirecte.

En effet, soit D l'adresse de destination du datagramme, alors la remise est directe si et seulement si la station ou le routeur dispose d'une interface avec le sous-réseau R de masque M , telle qu'en mettant à zéro tous les bits de D où ils sont à zéro dans M , on retombe sur R .

Ceci revient à opérer un *ET logique* bit à bit entre D et M , puis comparer les 32 bits obtenus avec R . En effet, on rappelle que la table de vérité du *ET logique* entre deux bits b_1 et b_2 est :

		valeurs de b_1	
		0	1
valeurs de b_2	0	0	0
	1	0	1

Exemple

Si une station ou un routeur, qui est connectée au sous-réseau 194.199.116.64 de masque 255.255.255.192 a un datagramme à envoyer à l'adresse 194.199.116.103, alors la remise sera directe.

En effet, le résultat du ET logique entre 194.199.116.103 et 255.255.255.192 donne 194.199.116.64, ce qui correspond à un réseau directement accessible. La figure ci-dessous illustre le calcul :

Destination :

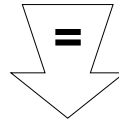
194 . 199 . 116 . 103

1 1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1

Masque :

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0

ET logique bit à bit



1 1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0

194 . 199 . 116 . 64

□

Exercice 15 (Remise directe et masques de sous-réseaux)

Soit un routeur connecté à quatre réseaux par l'intermédiaire de 4 interfaces :

- la première d'adresse 139.124.5.250 pour le réseau 139.124.5.0 et de masque 255.255.255.0
- la seconde d'adresse 194.199.10.171 pour le réseau 194.199.10.160 et de masque 255.255.255.224
- la troisième d'adresse 194.199.10.82 pour le réseau 194.199.10.64 et de masque 255.255.255.224
- la quatrième d'adresse 138.10.5.50 pour le réseau 138.10.0.50 et de masque 255.255.0.255

Parmi les destinations suivantes, lesquelles lui sont directement accessibles ?

1. 139.124.20.210
2. 139.124.5.133
3. 194.199.10.2
4. 194.199.10.90
5. 194.199.10.103
6. 138.10.5.51
7. 138.10.6.50

Il n'est pas nécessaire que l'adresse du sous-réseau d'une interface soit indiquée à la configuration car elle est déductible de l'adresse IP et du masque de sous réseau. En effet, connaissant le masque, il suffit de l'appliquer à l'adresse IP de l'interface pour en connaître l'adresse de sous-réseau.

Exercice 16 (Dédution de l'adresse de (sous-)réseau)

Quelles sont les adresses de (sous-)réseaux déductibles des couples suivants (sans faire référence à la RFC 1122:

1. Adresse IP 194.199.116.98 et masque 255.255.255.192 ?
2. Adresse IP 194.199.116.103 et masque 255.255.255.128 ?
3. Adresse IP 194.199.116.176 et masque 255.255.255.128 ?
4. Adresse IP 194.199.116.255 et masque 255.255.255.224

3.4.3 Masques par défaut

On peut remarquer que le dernier masque de l'exercice précédent indique qu'il n'y a pas de sous-réseaux car c'est le masque des adresses de classe B : seuls les 16 premiers bits sont à 1. Il n'y a donc aucun bit pour l'identifiant de sous-réseaux. Dans le routage d'origine d'IP vu en début de TP, lorsqu'on mettait l'identifiant de station à 0 pour retrouver l'adresse de réseau, on a implicitement utilisé les masques des classes A, B et C. Ceux-ci sont les suivants :

Classe	Masque
A	255.0.0.0
B	255.255.0.0
C	255.255.255.0

Les masques peuvent donc être utilisés même s'il n'y a pas de subnetting et font partie des configurations sous Unix et sous Windows.

i Par défaut, les masques sont positionnés selon la classe de l'adresse IP de l'interface, et doivent être modifiés en cas de subnetting.

3.5 Tables de routage modifiées et nouvel algorithme de routage

À l'intérieur d'un sous-réseau, les routes vers les sous-réseaux indirectement accessibles doivent apparaître dans les tables de routage, pour permettre l'acheminement des datagrammes à travers les sous-réseaux. Pour cela, on rajoute une colonne aux tables de routage vues précédemment, contenant le masque de sous-réseau associé à la destination.

Par exemple, un extrait de la table de routage d'une station du sous-réseau 194.199.116.128 de la section 3.3.2 peut être :

Destination	Masque	Routeur
194.199.116.128	255.255.255.192	0.0.0.0
194.199.116.64	255.255.255.192	194.199.116.190
...

Pour le routeur, un extrait de sa table peut être :

Destination	Masque	Routeur
194.199.116.128	255.255.255.192	0.0.0.0
194.199.116.64	255.255.255.192	0.0.0.0
...

Pour savoir si une adresse D correspond à une destination ¹ R , on applique à D le masque associé à R et on compare le résultat avec R . Si c'est la même adresse, alors D est une adresse correspondant à la destination R .

i La colonne *Masque* est présente dans les tables de la plupart des implémentations actuelles d'IP, y compris sous Unix et Windows. **L'avantage de cette approche est que toutes les routes peuvent être exprimées dans cette nouvelle version de la table de routage.**

Exemple

En début de TP (sections 2.3 et 2.5), la station d'adresse 175.110.28.82 devait connaître une route vers son propre réseau, vers le réseau 215.192.18.0 et vers l'ordinateur 112.3.45.67. Ceci est exprimable dans la table de la manière suivante :

Destination	Masque	Routeur
175.110.0.0	255.255.0.0	0.0.0.0
215.192.18.0	255.255.255.0	175.110.3.250
112.3.45.67	255.255.255.255	175.110.25.251

□

Lorsque la destination n'est pas subnettée ou qu'on n'a pas besoin de le savoir (par l'exemple, à l'extérieur du réseau subnetté), le masque associé est celui de la classe du réseau (comme les 2 premiers de la table). Lorsqu'il s'agit d'une route vers un ordinateur, alors tous les bits de l'adresse de destination du datagramme doivent correspondre à la destination, d'où le masque 255.255.255.255.

Enfin, il est très aisé d'indiquer une route par défaut : puisque la destination n'a pas d'importance, aucun bit n'a besoin d'être comparé : il faut tous les ignorer. La destination par défaut est donc 0.0.0.0 et son masque est 0.0.0.0. Pour la station précédente du sous-réseau 194.199.116.128, la table augmentée d'une route par défaut devient :

Destination	Masque	Routeur
194.199.116.128	255.255.255.192	0.0.0.0
194.199.116.64	255.255.255.192	194.199.116.190
0.0.0.0	0.0.0.0	194.199.116.190

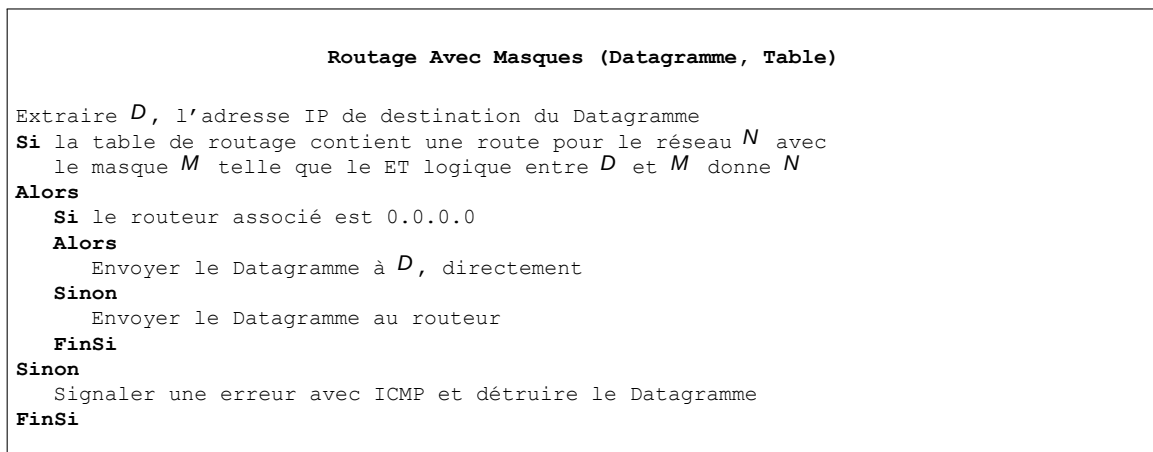
On remarque que plusieurs routes peuvent être trouvées pour une destination : **c'est celle dont le masque comporte le plus de bits à 1 qui sera retenue**. Par exemple, on préférera la destination 194.199.116.64 à la route par défaut pour l'adresse 194.199.116.60.

1. Souvent, la destination dans une table de routage correspond à un réseau ou un sous-réseau, mais on peut regrouper plusieurs adresses de (sous-)réseaux dans une seule destination. . .

Ici, le routeur est le même pour ces 2 destinations, on peut donc simplifier la table ainsi :

Destination	Masque	Routeur
194.199.116.128	255.255.255.192	0.0.0.0
0.0.0.0	0.0.0.0	194.199.116.190

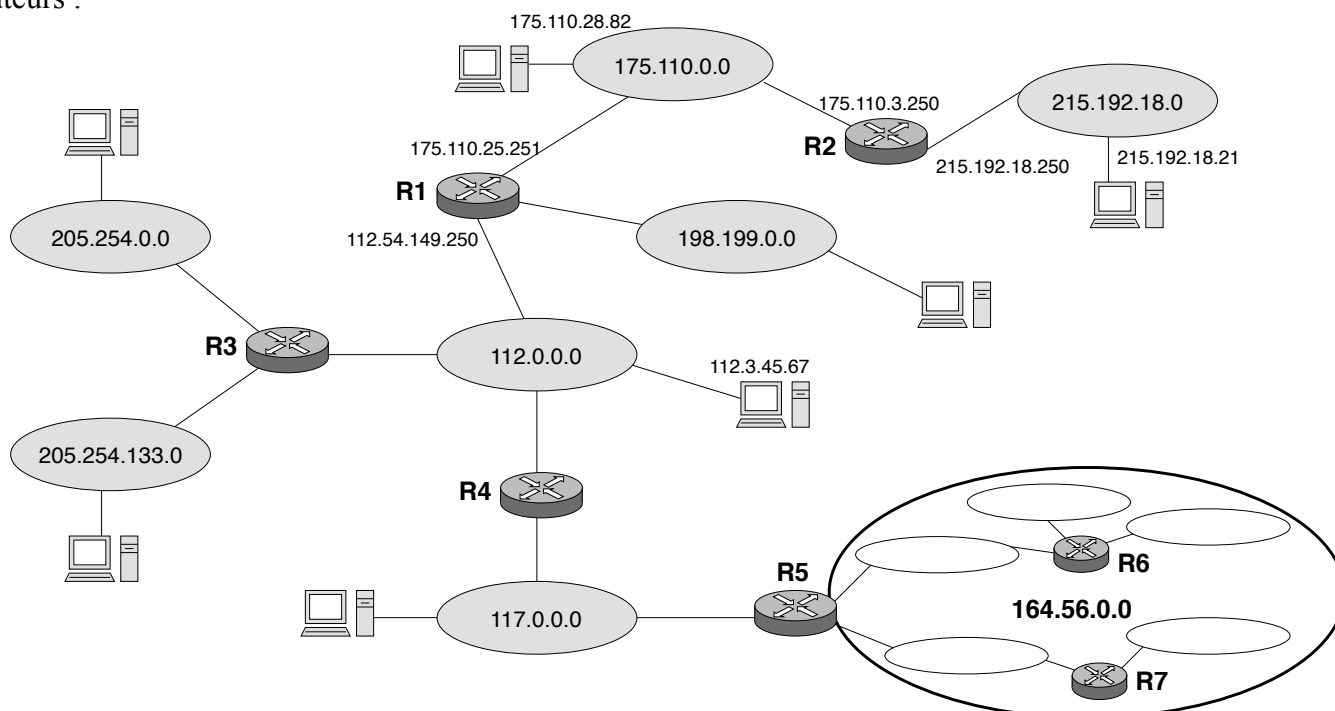
L'algorithme de routage peut être considérablement simplifié et devient :



Notons qu'en général, les destinations directement accessibles sont traitées à part ainsi que les adresses que la station elle-même doit reconnaître : ses propres adresses, celles en $127.X.Y.Z$ de l'interface *loopback*, les adresses de diffusion, de multidiffusion. L'algorithme est donc un peu plus compliqué que ça.

Exercice 17 (Extension du réseau avec du subnetting)

Reprenons le grand réseau de l'exercice 12 à la fin de la partie sur le routage sans masque. Comme le montre la figure ci-dessous, le réseau $164.56.0.0$ (le seul non grisé) est en fait constitué de plusieurs sous-réseaux et routeurs :



1. En suivant la recommandation du standard, et en utilisant 8 bits pour l'identifiant de sous-réseau collés à l'identifiant de réseau, proposer des partitions de l'adresse 164.56.0.0 pour ces sous-réseaux.
2. Attribuer aux routeurs R5, R6 et R7 les adresses les plus hautes disponibles dans chaque sous-réseau. S'il y a conflit entre deux routeurs, donner la plus grande à celui portant le plus grand numéro.
3. Écrire la table de routage d'une station de chacun des réseaux connectés à R6 ainsi que celles des routeurs R5, R6 et R7.
4. Est-ce que ce subnetting oblige de modifier les tables des machines extérieures, comme R4 ? Si oui, quelle(s) doit(ven)t être la (ou les) modification(s) à apporter ?

3.6 Sous-adressage variable

Jusqu'ici nous avons considéré que les sous-réseaux partagent le même masque de sous-réseau. De ce fait, tous les sous-réseaux ont la même taille maximale.

Si on se réfère à la table des possibilités de subnetting d'une adresse de classe B, présentée dans la section 3.3.2 page 11, alors une entreprise qui dispose de sous-réseaux de plus 2 500 stations, ne peut subnetter son adresse qu'avec au plus 4 bits pour l'identifiant sous-réseau, ce qui lui permet d'adresser au plus 14 sous-réseaux.

De même, si l'entreprise ne possède que des réseaux d'au plus 250 stations, elle peut utiliser 8 bits pour l'identifiant sous-réseau, ce qui lui permet d'adresser au plus 254 sous-réseaux.

Que se passe-t-il si une entreprise possède 9 sous-réseaux de 2 500 stations et 10 sous-réseaux de 1 500 stations ? La solution est d'utiliser un **sous-adressage variable** (*variable-length subnetting*), où les **sous-réseaux n'ont pas le même masque de sous-réseau**.

Exemple

Supposons que le réseau à subnetter ait l'adresse 139.124.0.0. Pour simplifier, on considère que l'entreprise n'a que 2 réseaux de 2 500 stations, appelés A et B, et que 4 sous-réseaux de 1 500 stations, appelés W, X, Y et Z. Considérons que la taille de ces réseaux n'évoluera dans le temps qu'à hauteur d'au plus 4 094 stations dans A et B, et d'au plus 2 046 stations dans W, X, Y et Z. Alors, une solution d'adressage qui respecte les recommandations et suffisante pour l'évolution de ces sous-réseaux est résumée dans le tableau suivant :

Sous-réseau	Nb. bits id. sous-réseau	Adresse	Masque de sous-réseau
A	4	139.124.16.0	255.255.240.0
B	4	139.124.32.0	255.255.240.0
W	5	139.124.64.0	255.255.248.0
X	5	139.124.72.0	255.255.248.0
Y	5	139.124.80.0	255.255.248.0
Z	5	139.124.88.0	255.255.248.0

□

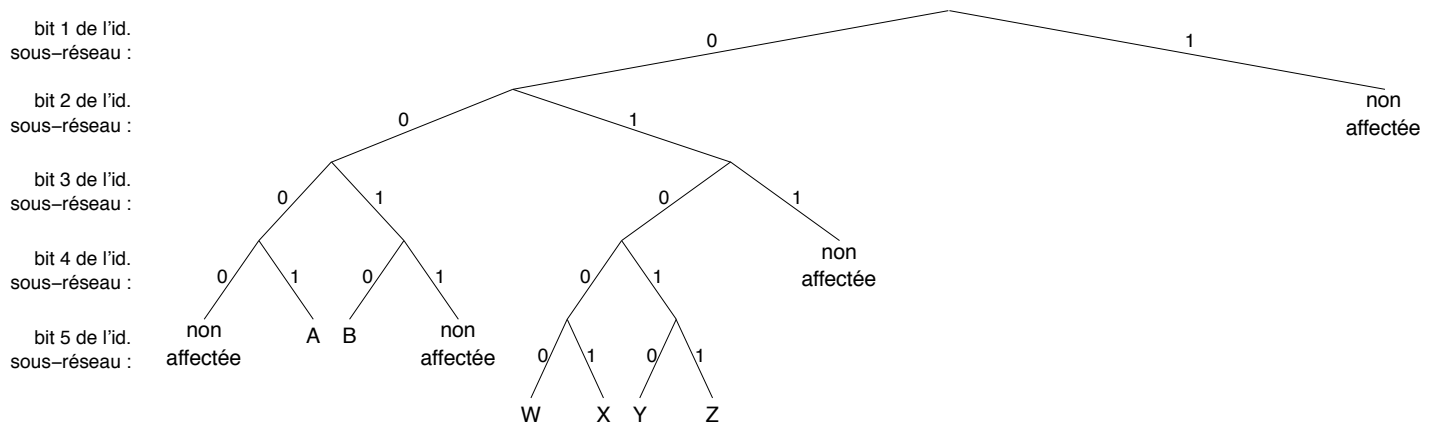
Bien entendu, cette méthode rend plus complexe les tables de routage et la gestion des adresses : l'administrateur doit s'assurer qu'aucune adresse attribuée n'appartient à plusieurs sous-réseaux, et il doit aussi savoir quelles adresses sont laissées libres pour des affectations futures.

Pour résoudre ces problèmes et affecter facilement les adresses aux sous-réseaux, une méthode simple consiste à construire un arbre binaire représentant les combinaisons que peuvent prendre les bits de l'identifiant sous-réseau, en tenant compte de la taille des sous-réseaux.

Dans notre exemple :

- pour adresser toutes les stations des sous-réseaux A et B, il faut que leur identifiant station ait une taille de 12 bits, ce qui laisse 4 bits pour l'identifiant sous-réseau
- pour adresser toutes les stations des sous-réseaux W, X, Y et Z, il faut que leur identifiant station ait une taille de 11 bits, ce qui laisse 5 bits pour l'identifiant sous-réseau.

L'arbre binaire qui a été fait pour les affectations d'adresses de l'exemple est le suivant :

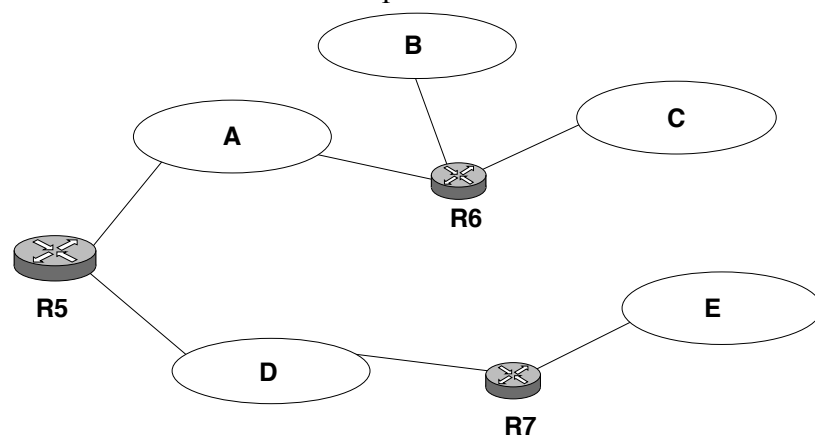


On remarque qu'il y a des combinaisons non affectées qui pourront l'être par la suite.

M On ne devra pas affecter à un sous-réseau une adresse sur une branche où tous les bits sont à 0 (la branche la plus à gauche) ni où tous les bits sont à 1 (la branche la plus à droite), sinon on ne respectera pas les recommandations.

Exercice 18 (réseau avec sous-adressage variable)

Reprenons le réseau 164.56.0.0 de l'exercice précédent :



Les sous-réseaux A, B, C, D et E ont des tailles différentes :

- A et E contiennent entre 9 000 et 16 382 stations
- B et C contiennent entre 6 000 et 8 190 stations
- D contient entre 3 000 et 4 094 stations

1. Subnetter le réseau et affecter un adresse et un masque à chaque sous-réseau. Afin que tout le monde obtienne les mêmes résultats, on se posera comme contrainte que l'adresse de A devra être sur la branche la plus à gauche possible, puis B devra être sur la branche la plus à gauche parmi les restantes possibles, etc.
2. Attribuer aux routeurs R5, R6 et R7 les adresses les plus hautes disponibles dans chaque sous-réseau. S'il y a conflit entre deux routeurs, donner la plus grande à celui portant le plus grand numéro.
3. Écrire les tables de R5, R6 et R7.