

Guy Pujolle

***Cours* réseaux *et* télécoms**

Avec exercices corrigés

Avec la contribution de Olivier Salvatori

3^e édition

© Groupe Eyrolles, 2000, 2004, 2008,

ISBN : 978-2-212-12414-9

EYROLLES



Introduction aux réseaux

Les réseaux permettent le transport d'informations d'un équipement terminal à un autre équipement terminal. Pour réaliser ce transport, l'information est découpée en blocs, appelés paquets. Les paquets sont acheminés sur des lignes de communication et transitent de nœud en nœud jusqu'à arriver au destinataire. Ce premier cours décrit les différents types de transferts de paquets dans un réseau et en détaille les propriétés. Internet est un réseau de transfert particulier, dans lequel les paquets ont un format spécifique contenant l'adresse du destinataire. Le transfert des paquets dans un nœud s'effectue grâce à cette adresse.

- Les transferts de paquets
- Propriétés du transfert de paquets
- Internet

■ Les transferts de paquets

Les réseaux naissent du besoin de transporter des informations d'un individu à un autre situé à une distance supérieure à la portée de la voix. Pour cela, il faut concevoir un moyen de transporter un signal *analogique* sur une ligne physique puis sur une voie hertzienne.

analogique. – Qui représente, traite ou transmet des données sous la forme de variations continues d'une grandeur physique.

bit. – (contraction de *binary digit*). Quantité d'information valant 0 ou 1. Également unité binaire de quantité d'information.

circuit. – Ensemble de ressources mettant en relation un émetteur et un récepteur. Ces ressources n'appartiennent qu'au couple émetteur-récepteur.

commutation de circuits. – Type de commutation dans lequel un circuit joignant deux interlocuteurs est établi à leur demande par la mise bout à bout des circuits partiels. Le circuit est désassemblé à la fin de la transmission.

signalisation. – Ensemble des éléments à mettre en œuvre dans un réseau de façon à assurer l'ouverture, la fermeture et le maintien des circuits.

Une autre solution, développée en parallèle, consiste à établir des codes pouvant traduire les lettres et les chiffres en des éléments simples, compréhensibles par le destinataire. Grâce à l'apparition de la logique binaire, les codes donnent lieu à des tables permettant de passer d'une lettre ou d'un signe à une suite d'éléments binaires, ou *bits*.

Historiquement, les premiers réseaux de télécommunications sont le télex et le téléphone. Ils consistent en un *circuit* formé d'une suite de supports physiques capables de mettre en relation un émetteur et un récepteur pendant toute la durée de la communication.

Cette technique s'améliore rapidement avec l'introduction de la *commutation de circuits*, qui permet aux circuits de se faire et se défaire à la demande des utilisateurs qui veulent communiquer.

Au départ, les circuits sont mis en place par des opérateurs capables de mettre bout à bout des morceaux de circuits. Cette implantation manuelle des circuits est ensuite remplacée par une mise en place automatique grâce à des commutateurs automatiques.

Dans les réseaux à commutation de circuits, il faut une *signalisation*.

La signalisation correspond à un passage de commandes, comme celles nécessaires à la mise en place d'un circuit à la demande d'un utilisateur. Les commandes de signalisation sont transportées dans des paquets spécifiques portant l'adresse du destinataire, comme l'illustre la figure 1-1. Au fur et à mesure de l'avancement de ces paquets sur le réseau, on met en place le circuit, qui achemine ensuite les données jusqu'au récepteur.

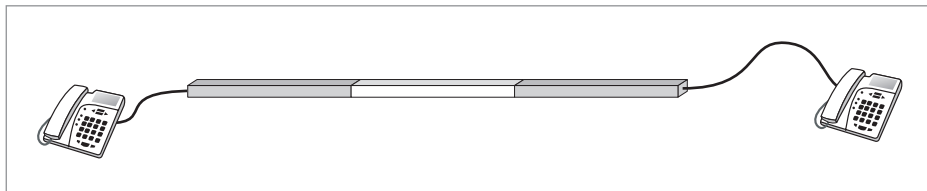


Figure 1-1. Mise en place d'un circuit entre deux téléphones.

L'inconvénient majeur de la commutation de circuits est la mauvaise utilisation des circuits mis en place pour la durée de la communication. Dans une communication téléphonique, par exemple, il est rare d'avoir deux paroles simultanément dans chaque sens de la communication, les interlocuteurs parlant généralement l'un après l'autre. Le circuit est donc utilisé, au plus, la moitié du temps. Si on enlève les blancs dans le cours de la parole, l'utilisation réelle du circuit est encore plus faible.

On pourrait améliorer la commutation de circuits en ne mettant en place le circuit que durant les moments où les signaux doivent être effectivement transmis. Cette solution demanderait toutefois un système de signalisation trop important et complexe en comparaison du gain réalisé.

Un autre exemple classique des limites de la commutation de circuits est la connexion d'un ordinateur à un serveur distant par l'intermédiaire d'un circuit. Quand l'ordinateur émet les informations contenues dans sa mémoire, le circuit est bien utilisé. Entre ces émissions, en revanche, le support physique reste inutilisé. Le taux d'utilisation du circuit devient alors encore plus faible que dans le cas du circuit de parole téléphonique.

Nous verrons un peu plus loin dans ce cours que le *transfert de paquets* permet de réaliser une meilleure utilisation du circuit.

paquet. – Entité de base acheminée par les réseaux. Un paquet contient un nombre variable ou fixe d'éléments binaires. Longtemps assez courts, de façon à éviter les erreurs, les paquets se sont allongés à mesure que les taux d'erreur diminuaient. Ils peuvent atteindre aujourd'hui plusieurs milliers d'octets.

transfert de paquets. – Technique générique consistant à transporter des blocs d'information de nœud en nœud pour les acheminer à un récepteur.

Questions-réponses

Question 1. – *Pourquoi la commutation de circuits demande-t-elle l'utilisation d'un réseau de signalisation ?*

Réponse. – Parce que le circuit n'est pas permanent. Il est mis en place à chaque demande de communication téléphonique. En d'autres termes, un même circuit entre deux nœuds est utilisé par différents clients au cours d'une même journée. À chaque nouvelle demande de communication téléphonique, le circuit allant de l'utilisateur émetteur à l'utilisateur destinataire doit être mis en place. Il l'est grâce au réseau de signalisation.

Question 2. – *Pourquoi la commutation de circuits est-elle peu à peu remplacée par la commutation de paquets ?*

Réponse. – La commutation de circuits est une bonne solution pour les applications à débit constant durant une longue période. Avec l'arrivée d'applications de nature très diverse, notamment d'applications fortement asynchrones, la commutation de paquets garantit une meilleure utilisation des ressources du réseau.

Question 3. – *La commutation de paquets permet-elle une bonne utilisation d'une liaison entre deux nœuds ?*

Réponse. – Oui, et c'est tout l'avantage de la commutation de paquets. Il suffit qu'il y ait toujours dans le nœud de départ un paquet prêt à être émis dès que la ligne devient libre. Dans ce cas, le taux d'occupation de la ligne peut atteindre 100 p. 100.

Les réseaux numériques

La deuxième révolution des réseaux a été celle de la *numérisation*, qui transforme un signal analogique en une suite d'éléments binaires (0 et 1).

numérisation.— Opération consistant à transformer un signal analogique, comme la parole, en une suite d'éléments binaires (0 et 1). Ce processus consiste à prendre des points dans le temps, appelés échantillons, et à envoyer leur valeur numérique vers le récepteur.

donnée informatique.— Élément d'information simple composé de texte, par opposition aux données multimédias complexes.

protocole.— Ensemble de règles à respecter aux deux extrémités communicantes d'un réseau pour qu'un transport d'information soit possible. La méthode de transfert de données définie par un protocole constitue le moyen d'acheminer les informations sur le réseau.

Le réseau Internet, que nous examinons en fin de cours, est un réseau numérique. Cela signifie que les informations y sont transformées en suites de 0 et de 1, et ce quel que soit le type d'information, voix, *donnée informatique* ou vidéo.

Jusqu'à une période récente, les réseaux étaient caractérisés par l'information qu'ils transportaient : réseaux des opérateurs de télécommunications pour la parole téléphonique, réseaux informatiques Internet pour relier les ordinateurs à des serveurs, réseau de diffusion vidéo pour la télévision.

Par le biais de la numérisation, on assiste aujourd'hui à l'intégration de tous ces services voix, données, vidéo sur chacun de ces réseaux, qui deviennent ainsi de plus en plus multimédias, même s'ils restent encore souvent cantonnés dans le transport d'un seul type d'information.

L'objectif du réseau Internet, ainsi que des réseaux de type Internet que l'on appelle réseaux IP (*Internet Protocol*), est de permettre cette superposition et de devenir de ce fait des réseaux multimédias, même si jusqu'à une période récente Internet était essentiellement vu comme une solution d'interconnexion de machines terminales avec des serveurs distants.

Pour réaliser ces réseaux IP, il faut des règles du jeu, que l'on appelle des *protocoles*, à respecter aux deux extrémités communicantes du réseau.

Questions-réponses

Question 4.— *Puisque les réseaux numériques ne transportent que des 0 et des 1, comment est-il possible de reconnaître ce qui est transporté ?*

Réponse.— La suite d'éléments binaires, ou bits, est en fait une suite d'octets (ensemble de 8 bits). À chaque ensemble de 8 bits correspond une valeur ou une lettre. Cela permet d'indiquer dans l'en-tête du paquet ce qui est transporté. La suite d'éléments binaires peut être regroupée en mots, dont la longueur n'est pas nécessairement de 1 octet mais d'une valeur quelconque de bits, 7, 8, 10, 16, etc.

Question 5.— *Pourquoi plusieurs protocoles sont-ils nécessaires pour réaliser une communication ?*

Réponse.— Pour réaliser une communication, les deux extrémités doivent se mettre d'accord sur un très grand nombre de règles, telles que les suivantes : quelle forme doit prendre le signal pour indiquer un 0 et un 1 ? Comment déterminer la longueur du paquet ? Comment s'effectuent les reprises sur erreur ? Comment les paquets sont-ils aiguillés dans les nœuds ? Comment les flots sont-ils contrôlés pour qu'il n'y ait pas de débordement ? Etc.

Le transport des données

Comme nous l'avons vu, l'inconvénient du circuit provient des piètres performances obtenues lorsque l'information à transporter n'arrive pas de façon régulière. La plupart des grands réseaux utilisent la technique de transport consistant à paquétiser l'information, c'est-à-dire à regrouper en paquets le flot des bits à transporter. Une information de contrôle est ajoutée au paquet pour indiquer à qui appartient le paquet et à qui il est destiné.

Le paquet peut être défini comme une entité de base acheminée par les réseaux. Un paquet contient un nombre variable ou fixe d'éléments binaires. Longtemps assez courts, de façon à éviter les erreurs, les paquets se sont allongés à mesure que les taux d'erreur diminuaient, et ils peuvent atteindre aujourd'hui plusieurs milliers d'octets.

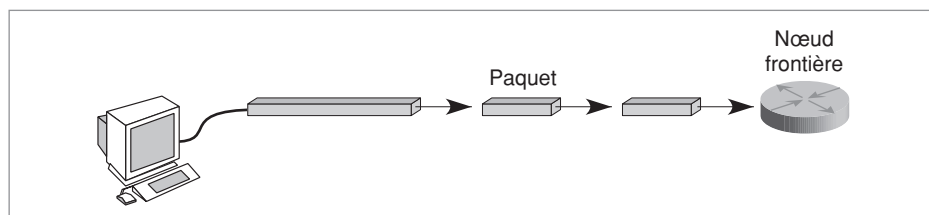


Figure 1-2. Terminal émettant des paquets sur un circuit.

Une fois les paquets prêts, ils sont envoyés vers un premier nœud, le nœud frontière, ou *edge node*. Ce nœud permet aux paquets d'entrer dans le réseau de l'opérateur. Ils traversent ensuite un *réseau maillé*, passant de nœud en nœud jusqu'à atteindre le destinataire.

La *capacité* des lignes qui desservent les nœuds s'exprime en bit par seconde (bit/s). Comme les nœuds actuels permettent de traiter un grand nombre de paquets à la seconde, les capacités des lignes s'expriment en Kbit/s, Mbit/s et Gbit/s.

Un transfert de parole téléphonique par paquets est représenté à la figure 1-3. Du téléphone sortent des octets les uns derrière les autres grâce à un codeur-décodeur, appelé *codec*. Les octets sont mis dans un paquet jusqu'à ce que le paquet soit plein ou que l'on ne puisse attendre plus longtemps. En effet, la parole téléphonique est une application dite *temps réel*. Cela implique qu'entre le moment du départ de la voix et l'arrivée de cette voix à l'oreille du destinataire ne s'écoulent pas plus de 100 ms. C'est le temps maximal pour obtenir une bonne qualité de la communication.

Il n'est donc pas possible de placer beaucoup d'octets dans un paquet. Si nous prenons l'exemple d'un débit de parole à 8 Kbit/s, ce que l'on trouve approximativement dans le GSM, le codec génère un octet toutes les 1 ms. En règle

réseau maillé.— Ensemble de nœuds reliés par des lignes de communication permettant le choix entre plusieurs routes d'une entrée du réseau vers une sortie.

capacité.— Quantité d'information qu'un ordinateur ou un périphérique peut stocker ou traiter.

codec (acronyme de codeur-décodeur).— Appareil qui effectue le codage numérique d'un signal analogique lors de son émission ou qui restitue (décodage) un signal analogique lors de la réception d'un signal numérique.

temps réel (en anglais *real time*).— Mode dans lequel le temps qui s'écoule entre l'émission et la réception est limité à une valeur faible dépendant de l'application.

générale, on limite la taille du paquet à 16 octets de données, ce qui représente déjà 16 ms de perdu par le seul remplissage du paquet.

Un transfert de voix téléphonique par paquet correspond à la génération d'un grand nombre de tout petits paquets peu espacés (*voir la figure 1-3*). Si le paquet avec ses en-têtes atteint 64 octets, sur une ligne à 512 000 bit/s, il faut 1 ms pour l'envoyer, avec un temps d'écoulement entre deux paquets de 16 ms. Si la ligne était de 5 120 000 bit/s, il faudrait 0,1 ms pour l'émettre, avec toujours 16 ms entre deux paquets. Cet exemple montre bien que lorsque la parole passe par un circuit, ce dernier est particulièrement mal utilisé.

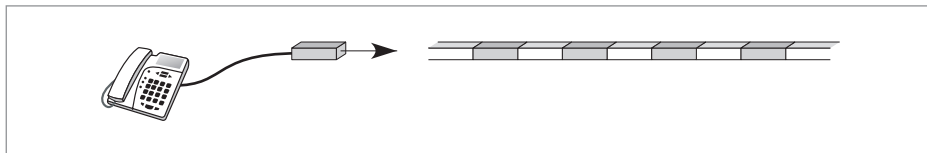


Figure 1-3. Transfert de parole téléphonique par paquet.

Il est possible de comparer la commutation de circuits et le transfert de paquets en regardant ce qui se passe sur les supports physiques.

La figure 1-4 décrit le cheminement de paquets dans un réseau à commutation de circuits.

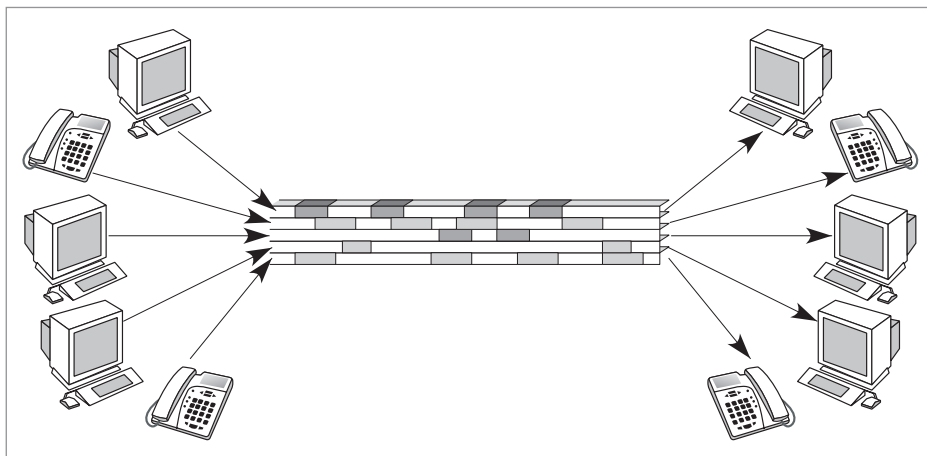


Figure 1-4. Cheminement des paquets dans un réseau à commutation de circuits.

bande passante.—
Plage des fréquences
qui peuvent être trans-
mises correctement
sur un support.
S'exprime en Hertz
(Hz).

Si l'on utilise la même liaison physique pour effectuer un transfert de paquets, on obtient le schéma de la figure 1-5. Chaque paquet est émis dans un très court laps de temps puisque l'ensemble de la *bande passante* lui est fourni. À un instant donné, il n'y a qu'un seul paquet qui passe sur la ligne et qui prend donc l'ensemble de la ressource physique de transmission disponible.

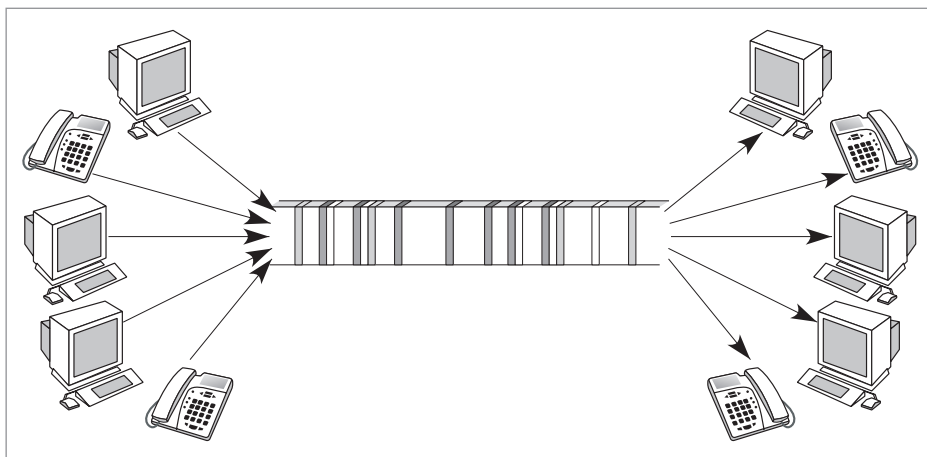


Figure 1-5. *Cheminement des paquets dans un réseau à transfert de paquets.*

On voit tout de suite qu'il n'est pas possible d'augmenter le nombre de connexions en commutation de circuits, une fois que l'ensemble des circuits est utilisé. À l'inverse, avec le transfert de paquets illustré à la figure 1-5, le support physique est loin d'être saturé, et il est possible de faire passer beaucoup plus de paquets en augmentant le nombre de machines terminales. C'est ce que montre la figure 1-6.

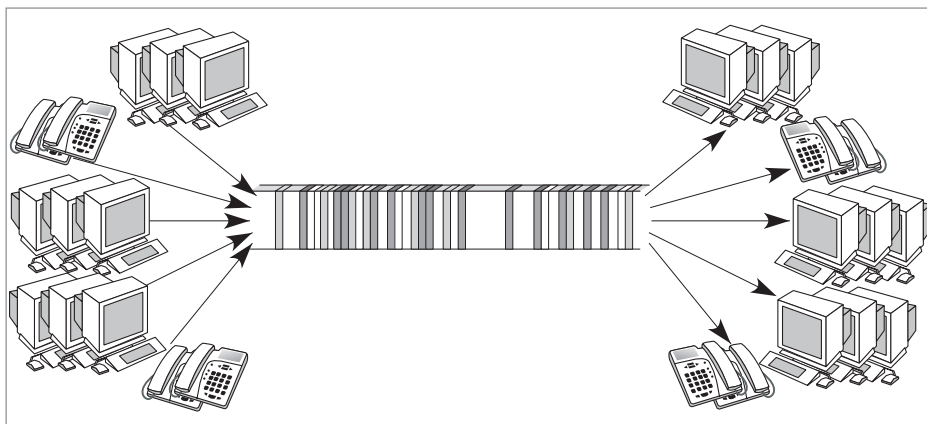


Figure 1-6. *Augmentation du nombre de machines terminales dans un réseau à transfert de paquets.*

Les figures 1-5 et 1-6 illustrent bien l'avantage apporté par un transfert global de paquets du fait de la meilleure utilisation des ressources du support physique. En revanche, la difficulté entraînée par cette technique est également très apparente : les paquets doivent parfois attendre à l'entrée du réseau.

Si plusieurs paquets se présentent simultanément à l'entrée de la ligne, il faut les sérialiser, c'est-à-dire les faire passer les uns derrière les autres. Pour cela, il faut une mémoire qui soit capable de les stocker avant leur entrée dans le réseau. La difficulté qui s'ensuit est la *synchronisation* des paquets à la sortie du réseau.

synchronisation.–

Action consistant à déterminer des instants où des événements doivent se produire.

resynchronisation.–

Obligation de transmettre au récepteur différents flots à des instants synchronisés.

Dans le cas de la figure 1-6, la liaison prend en charge des paroles téléphoniques. Pour que la parole téléphonique arrive correctement à l'oreille du destinataire, il faut que les petits paquets arrivent au récepteur téléphonique dans un laps de temps limité. Si l'attente est trop longue dans la mémoire d'entrée, les temps à respecter peuvent ne pas être satisfaits à la sortie.

Nous détaillons ce cas particulier de *resynchronisation* des paquets ultérieurement dans ce cours.

Questions-réponses

Question 6.– *Pourquoi divise-t-on les messages des utilisateurs en paquets plutôt que d'envoyer directement tout le message ?*

Réponse.– L'avantage de la division des messages des utilisateurs en paquets est qu'elle permet de bien répartir l'utilisation des ressources entre tous les utilisateurs. Si un message long était émis, il pourrait monopoliser une liaison et donc mettre en attente les autres applications. En découpant les messages en paquets, on peut partager plus efficacement les ressources.

Question 7.– *Si l'on veut transporter un flot d'information de type télévision, un paquet peut-il contenir toute une image ?*

Réponse.– Une image de télévision contient approximativement 250 000 points à transporter. Si chaque point est codé sur un octet, cela fait 2 000 000 de bits. C'est beaucoup plus important que la taille d'un paquet, qui varie généralement entre 125 et 1 500 octets. Une image doit donc être découpée en morceaux pour être transportée. Même si les images sont compressées avant d'être transportées, ce qui réduit leur taille à une valeur très inférieure à 2 000 000 de bits, elles restent le plus souvent découpées en morceaux pour être acheminées dans des paquets.

Question 8.– *Le transport d'applications multimédias (voix, vidéo, données informatiques) pose-t-il des problèmes particuliers par rapport au transport de données informatiques entre ordinateurs ?*

Réponse.– Le multimédia pose de nombreux problèmes, qui n'étaient pas traités à l'origine par les réseaux de transport de données reliant les ordinateurs. Par exemple, le transport de la parole téléphonique nécessite de découper la parole en bribes puis d'envoyer ces dernières dans des paquets, qui doivent être restitués à des instants précis pour récupérer le caractère continu de la parole. Le transport de données multimédias pose bien d'autres problèmes, notamment la resynchronisation des médias, le multipoint (le fait d'envoyer de l'information vers plusieurs points simultanément) ou la sécurité nécessaire à certaines informations.

Routage et contrôle de flux

Les caractéristiques des protocoles permettant d'acheminer les paquets d'un émetteur vers un récepteur varient considérablement.

Il peut être décidé, par exemple, que tous les paquets passent par un même chemin. À l'inverse, chaque paquet peut être livré à lui-même dans le réseau. Dans ce cas, le paquet porte simplement l'adresse du destinataire et choisit sa route à chaque nœud jouant le rôle de carrefour. Comme plusieurs chemins permettent d'atteindre le destinataire, à l'entrée du nœud, le paquet examine les directions acceptables et choisit en fonction des embouteillages qu'il aperçoit.

La figure 1-7 illustre une situation dans laquelle, pour aller d'un émetteur vers un récepteur, au moins deux routes différentes sont disponibles.

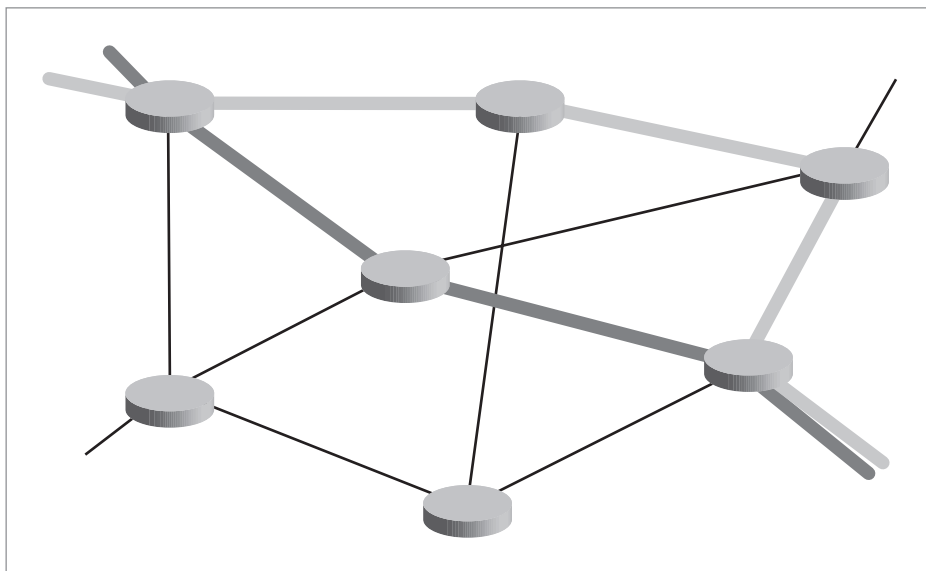


Figure 1-7. Le routage de paquets.

Cette situation ne va pas sans inconvénients. Le message d'un utilisateur étant souvent décomposé en plusieurs paquets, ce que l'on nomme un *flot*, ces derniers peuvent arriver d'une façon désordonnée. De plus, les nœuds de transfert deviennent complexes, puisqu'ils doivent décider dans quelle direction envoyer les paquets.

En contrepartie, la souplesse augmente. Si une route se trouve coupée ou fortement congestionnée, le paquet peut prendre une autre direction. Dans le cas d'un *routage fixe*, une coupure peut avoir des conséquences fâcheuses, puisqu'il faut ouvrir une nouvelle route, ce qui peut se révéler difficile. En dépit de ce manque de flexibilité, le routage fixe reste une solution simple et performante.

Une autre difficulté importante du routage des paquets provient de la nécessité d'un contrôle de flux dans le réseau. La figure 1-8 illustre un nœud cen-

routage.— Détermination du chemin emprunté dans un réseau maillé par un message ou un paquet de données.

flot.— Ensemble des paquets provenant d'une même source et allant vers un même destinataire.

routage fixe.— Technique de routage particulièrement simple dans laquelle la table de routage ne varie pas dans le temps. Chaque fois qu'un paquet entre dans un nœud, il est envoyé dans la même direction, qui correspond, dans presque tous les cas, à la route la plus courte.

tral du réseau recevant des paquets d'information de toute part. Cela risque de le surcharger rapidement s'il ne parvient pas à réémettre les paquets aussi vite qu'il les reçoit.

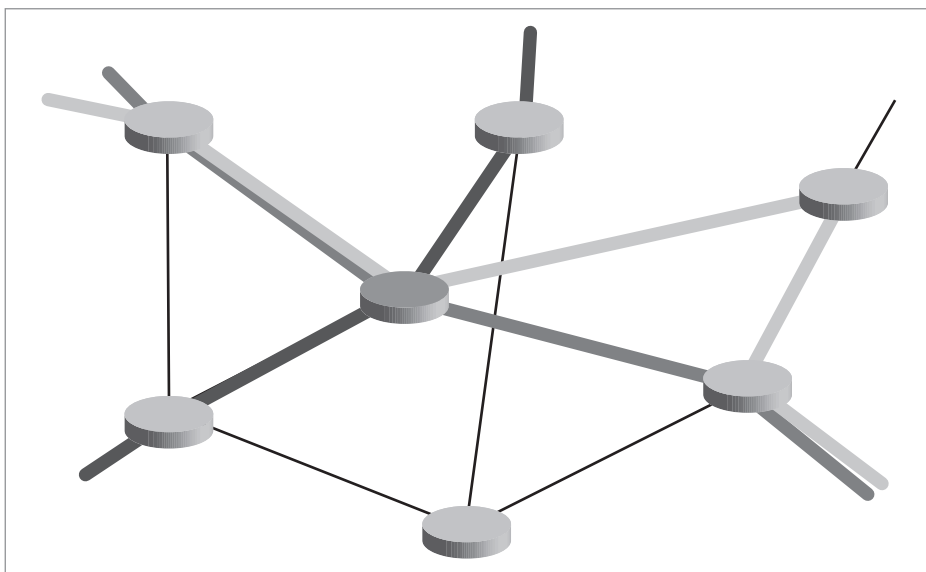


Figure 1-8. Le risque de saturation du nœud central.

Pour résoudre les problèmes de congestion potentiels, il faut être capable de gérer les flots de paquets en leur interdisant d'entrer dans le réseau ou en les faisant passer par des chemins détournés lorsque les nœuds les plus utilisés sont saturés.

De très nombreuses possibilités de contrôle ont été déterminées et testées. Nous verrons dans le cours de cet ouvrage celles qui sont mises en œuvre le plus couramment dans les réseaux.

Questions-réponses

Question 9.– Combien existe-t-il de possibilités d'échange de données dans les réseaux maillés destinés à acheminer les paquets ? Peut-on mélanger ces différentes manières de fonctionner ?

Réponse.– Il existe deux possibilités principales de transfert de données, le routage de paquets et la commutation de paquets, qui peuvent à leur tour engendrer d'autres solutions particulières. Dans le routage de paquets, le nœud choisit la meilleure ligne de sortie grâce à l'adresse du destinataire. Dans la commutation de paquets, le paquet est toujours expédié vers la même ligne de sortie, décidée une fois pour toute lorsque les deux utilisateurs ont accepté de s'échanger l'information. Le mélange des deux solutions n'est pas acceptable. Dans le premier cas, le paquet doit contenir l'adresse complète du destinataire, alors que ce n'est pas le cas dans la commutation (*pour en savoir plus, voir le cours 4, Les techniques de transfert*).

Question 10.– Dans quel cas un réseau peut-il devenir embouteillé ?

Réponse. – Il suffit de prendre un nœud auquel peuvent se connecter dix clients à 1 Mbit/s et une ligne de sortie d’une capacité de 5 Mbit/s. Si les dix clients émettent à une vitesse proche de leur valeur maximale et que les paquets doivent passer par cette ligne de sortie, un embouteillage peut se créer sur le nœud.

Question 11.– Laquelle des deux techniques décrites à la question 9, routage ou commutation, vous paraît-elle la plus apte à éviter la congestion des nœuds ?

Réponse. – Le routage prend mieux en compte les phénomènes de congestion puisque le nœud est capable de diriger les paquets vers des routes libres. Dans la commutation, en revanche, si une route passe par un point de congestion, il n’existe pas de moyen simple de modifier son trajet. Il faut commencer par ouvrir une nouvelle route, et cela peut demander un temps assez long.

Question 12.– À votre avis, quelle application (voix, vidéo ou données informatiques) utilisait le plus de capacité au 1^{er} janvier 2000 ? Et quelles sont celles qui en utiliseront le plus en 2005 et en 2010 ?

Réponse. – Au début de l’année 2000, la parole téléphonique représentait la capacité la plus grande, chaque communication étant comptabilisée à 64 Kbit/s. En 2005, les données précéderont très largement la parole téléphonique à l’échelon mondial. En 2000, les données sont déjà bien plus importantes que la parole à transiter sous l’Atlantique. En 2010, il y a de fortes chances que l’arrivée massive de la vidéo, et notamment de la vidéo à la demande, en fasse l’application la plus consommatrice de bande passante.

■ Propriétés du transfert de paquets

Les réseaux que nous connaissons aujourd’hui ont des origines diverses. Les premiers d’entre eux ont été créés par les opérateurs de télécommunications. Ils sont spécialisés dans le transport de la parole téléphonique. Cette application de transfert de la parole téléphonique, qui nous paraît si naturelle, possède en réalité des caractéristiques complexes et pose de nombreux problèmes, que nous développerons ultérieurement dans ce cours.

Les réseaux téléphoniques des opérateurs de télécommunications, appelés *réseaux téléphoniques commutés*, sont de type commuté parce qu’ils mettent en œuvre une commutation, c’est-à-dire un moyen permettant à une entrée dans un nœud de faire correspondre toujours la même sortie du nœud.

La deuxième catégorie de réseaux est fournie par les réseaux qui ont été développés beaucoup plus récemment pour interconnecter les ordinateurs. Dans cette catégorie se trouvent les réseaux utilisant le protocole IP (*Internet Protocol*) pour transférer les paquets dans le réseau Internet. C’est ce même protocole qui permet aux réseaux des fournisseurs de services Internet, qu’on pourrait appeler les opérateurs Internet, d’accéder au réseau.

réseau téléphonique commuté (RTC). – Correspond à l’environnement téléphonique, constitué de lignes de communication travaillant en mode circuit.

isochrone (application).— Se dit d'une application caractérisée par de fortes contraintes temporelles de réception. Par exemple, la parole téléphonique classique demande que le récepteur reçoive un octet toutes les 125 microsecondes (μ s).

La spécificité de ces réseaux par rapport à ceux des opérateurs de télécommunications tend à diminuer. Comme nous le verrons, si la philosophie des deux architectures demeure différente, les architectures elles-mêmes ne sont pas si éloignées. En s'adjoignant de nouveaux protocoles adaptés au transport des informations *isochrones*, comme la parole téléphonique, les architectures de ces réseaux se sont rapprochées de celles des réseaux des opérateurs de télécommunications.

Propriétés de base

Au début des années 70, les industriels de l'informatique ont lancé leurs propres réseaux pour l'acheminement et le traitement à distance des données. Il s'agissait au départ d'interconnecter des ordinateurs entre eux ainsi que des terminaux passifs sur ces ordinateurs.

paquetisation.— Action de regrouper en paquets le flot de bits à transporter. Une information de contrôle est ajoutée pour indiquer à qui appartient le paquet et à qui il est destiné.

Avec l'apparition des PC, on a commencé à relier les stations de travail aux sites centraux et aux serveurs. Ces infrastructures se sont ensuite complexifiées pour prendre des formes très diverses. La technique de base est cependant restée la même : elle s'appuie sur le transfert de paquets, qui consiste, comme expliqué précédemment, à placer l'information dans des blocs de données de format prédéfini — c'est la *paquetisation* —, et à les faire transiter de nœud en nœud jusqu'au destinataire. Ce dernier effectue la *dépaquetisation* de l'information pour la restituer à l'utilisateur final, c'est-à-dire enlever la zone de données du paquet pour la transformer en un flot de données.

dépaquetisation.— Action de retirer la zone de données d'un paquet pour la transformer en un flot de données.

De nombreuses variantes de cette méthode ont été proposées, qui consistent à adapter le format des paquets au type d'application à transporter. Par exemple, si l'on devait inventer un réseau de transfert de paquets pour la parole téléphonique, il faudrait concevoir des paquets de taille extrêmement réduite de façon à ne pas perdre de temps en paquetisation des données. En effet, en prenant comme exemple le GSM, le flux est d'un octet toutes les millisecondes. Pour remplir un paquet de 1 000 octets, il faudrait 1 000 ms, c'est-à-dire une seconde, ce qui est beaucoup trop lent. Il faut donc de tout petits paquets.

Pour le transfert de fichiers, au contraire, la tendance est à adopter de très longs paquets puisque les données sont disponibles sur un disque.

On regroupe toutes ces méthodes, correspondant à des formats de paquets spécifiques, sous le vocable générique de transfert de paquets, qui consiste, comme on l'a vu, à transporter des blocs d'information de nœud en nœud pour les acheminer vers un récepteur.

La difficulté de ce type de transfert réside dans la récupération de la synchronisation. En effet, le temps de traversée d'un paquet dépend du nombre de paquets en attente dans les nœuds de transfert et du nombre de retransmissions consécutives à des erreurs en ligne.

Le transport d'applications à forte synchronisation et à contraintes temporelles importantes, comme la parole téléphonique, pose des problèmes complexes, qui ne peuvent être résolus que dans certains cas. En supposant qu'une conversation téléphonique entre deux individus accepte un retard de 150 ms (300 ms aller-retour), il est possible de resynchroniser les octets si le temps total nécessaire à la paquetsation-dépaquetsation et à la traversée du réseau est inférieur à 150 ms. Les fonctions intelligentes nécessaires pour effectuer ces contrôles temporels sont implantées dans les terminaux informatiques, en général des PC mais aussi des téléphones IP.

La figure 1-9 illustre le processus de resynchronisation, avec l'arrivée régulière des paquets 1, 2, 3, 4 et 5 au récepteur, un temps de traversée du réseau aléatoire et une attente plus ou moins longue au récepteur pour resynchroniser les paquets à la sortie. La resynchronisation s'effectue grâce à un temporisateur unique, qui se déclenche lors de l'émission de chaque paquet.

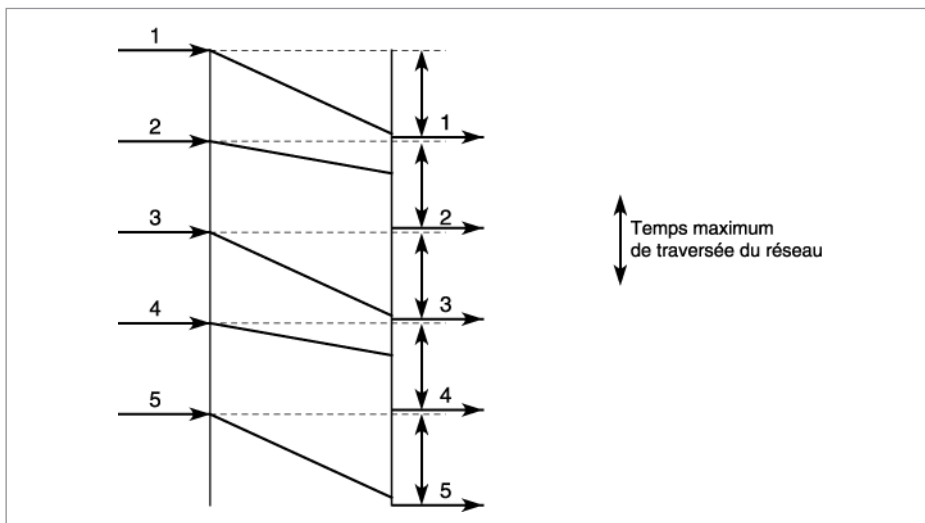


Figure 1-9. Resynchronisation d'une application isochrone.

Avec un terminal non intelligent, analogique et sans dispositif de suppression d'écho, comme un combiné téléphonique standard, la reconstruction du flux synchrone est quasiment impossible après la traversée d'un réseau de transfert de paquets un tant soit peu complexe. Le réseau Internet, par exemple, ne comporte pas de technique de transfert de paquets ni de protocoles associés suffisants pour toujours satisfaire à ces conditions, en particulier la contrainte temporelle.

Le deuxième facteur d'évolution des réseaux informatiques concerne le traitement de l'information. Le nombre croissant d'applications transitant sur les réseaux rend le transfert plus complexe. Le mélange des médias que cela occa-

sionne implique des traitements plus lourds et réclame la mise au point d'équipements terminaux de plus en plus intelligents.

Questions-réponses

Question 13.— Soit un codeur permettant de transformer la parole analogique en un flot d'octets à 64 Kbit/s. Quel est le temps de paquetsisation nécessaire à un paquet de 48 octets de données ?

Réponse.— Comme le temps qui s'écoule entre deux octets, que l'on appelle échantillons, est de 125 μ s, (64 Kbit/s = 8 Ko/s = 1 octet toutes les 125 μ s), le temps de remplissage d'un paquet de 48 octets est de 48 fois 125 μ s, ce qui donne 6 ms. Chaque paquet transporte donc 6 ms de parole.

Question 14.— En conservant l'exemple de paquet précédent, donner le temps maximal de traversée d'un réseau ayant une contrainte temporelle d'écho (traversée du réseau en moins de 28 ms).

Réponse.— On a vu que le temps de paquetsisation était de 6 ms. Le temps de dépaquetsisation est donc également de 6 ms. Cela signifie que le dernier octet est remis au récepteur 6 ms après le premier. Entre la paquetsisation et la dépaquetsisation, il existe un parallélisme qui fait que le premier octet du flot attend 6 ms avant que le paquet soit émis mais n'attend rien au niveau du récepteur (puisqu'il est le premier), tandis que le dernier octet du paquet n'attend rien au niveau de l'émetteur mais attend 6 ms à celui du récepteur avant d'être remis. Au temps de 28 ms, correspondant au délai maximal acceptable pour que l'écho ne soit pas gênant, il faut donc ôter 6 ms, ce qui donne 22 ms de temps de traversée maximal.

Question 15.— Si le nombre d'octets transportés dans un paquet standard est de 32, quelle est la distance maximale entre les deux points les plus éloignés du réseau, sachant que la vitesse moyenne de propagation du signal sur un support métallique est de 200 000 km/s ?

Réponse.— Si le nombre d'octets transportés par un paquet est de 32, il faut 4 ms pour le remplir avec un flux composé d'un octet toutes les 125 μ s. En raison du parallélisme décrit à la question 10, le temps total pour traverser le réseau est de $28 - 4 = 24$ ms. La distance maximale est donc de 4 800 km.

Question 16.— Calculer la probabilité qu'un élément binaire soit en erreur lorsque le paquet a une longueur de 1 000 bits puis de 1 million de bits, sachant que le taux d'erreur est de 10^{-3} puis de 10^{-6} et enfin de 10^{-9} . Qu'en déduire ?

Réponse.— Si le taux d'erreur est de 10^{-x} , la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur est de $(1 - 10^{-x}) \times 1\,000$ dans le premier cas et de $(1 - 10^{-x}) \times 1\,000\,000$ dans le second. Pour trouver la probabilité qu'il y ait une erreur, il suffit de retrancher de 1 le résultat obtenu précédemment. On obtient le tableau de résultat suivant :

	$x = 3$	$x = 6$	$x = 9$
1 000 bits	0,63	0,001	10^{-6}
1 000 000 bits	1	0,63	0,001

Ce tableau montre que lorsque le taux d'erreur est important et que le paquet est long, la probabilité que le paquet soit en erreur est élevée. Cela se traduit par l'obligation de mettre en place des algorithmes pour détecter les erreurs et les corriger et de réduire la taille des paquets dès que le taux d'erreur devient important.

écho. — Phénomène susceptible d'affecter un circuit de transmission, qui consiste en une répercussion du signal vers son émetteur avec une puissance suffisante pour qu'il soit décelable.

Question 17.– Supposons qu'un paquet ait une longueur de 128 octets et que, sur ces 128 octets, 40 soient dévolus à la supervision (contrôle de la communication et contrôle d'erreur). Si l'on encapsule ce paquet dans un autre paquet ayant également 40 octets de supervision, calculer le pourcentage de données de supervision qui sont transportées dans le flot ? Qu'en déduire ?

Réponse.– Si 40 octets forment la longueur des données de supervision contenues dans l'en-tête d'un paquet, cela indique qu'il reste 88 octets de données. Dans le cadre de l'encapsulation, on ajoute 40 octets de supervision supplémentaires. Pour transporter 88 octets, il y a donc $2 \times 40 = 80$ octets de supervision. Le pourcentage recherché est de $80/168$, soit un peu moins de 50 p. 100 de données de supervision. Cela signifie qu'un peu plus de la moitié du flux représente les données de l'utilisateur. On peut en déduire que l'encapsulation n'économise pas la capacité de transport. La figure 1-10 illustre l'encapsulation et la décapsulation d'un paquet IP (Internet Protocol).

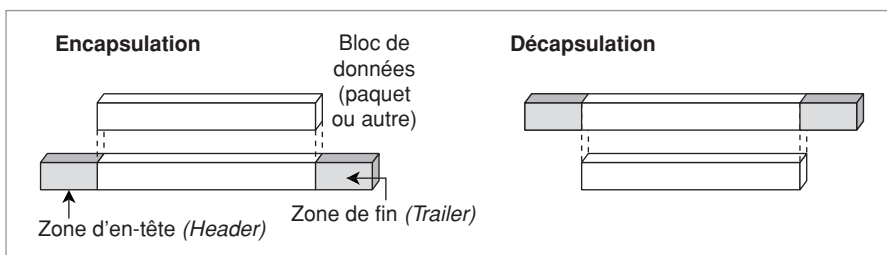


Figure 1-10. Encapsulation-décapsulation d'un paquet IP.

supervision.– Ensemble des opérations de contrôle de la communication.

contrôle d'erreur.– Action permettant de détecter les éléments binaires dont la valeur a été modifiée durant la transmission.

en-tête de paquet.– Partie d'un paquet qui contient les données de supervision.

encapsulation-décapsulation.– Dans les communications réseau, technique consistant à placer un bloc (paquet, trame, etc.) constitué de données et de procédures (supervision, etc.) dans une autre entité, ou capsule (paquet, trame, etc.), puis à les extraire séparément.

■ Internet

Le mot Internet vient d'*InterNetwork*, que l'on peut traduire par interconnexion de réseaux. Internet est donc un réseau de réseaux, comme le montre la figure 1-11.

Au début des années 1970, les nombreux réseaux qui commençaient à apparaître avaient une structure de paquet disparate, qui rendait leur interconnexion particulièrement complexe. L'idée à l'origine d'Internet a consisté à réclamer de chacun de ces réseaux d'encapsuler dans leurs paquets spécifiques un autre paquet à la structure unique, autrement dit un paquet commun : le paquet IP.

Pour aller d'une machine à une autre, il faut aller de sous-réseau en sous-réseau. Par exemple, à la figure 1-11, une communication entre les machines terminales A et B implique une encapsulation des paquets IP partant de A dans le paquet du sous-réseau 1. Une fois le paquet du sous-réseau 1 arrivé à la passerelle X, celui-ci est décapsulé et réintroduit dans le paquet du sous-réseau 2. Le sous-réseau 2 achemine le paquet jusqu'à la passerelle Y, où, de nouveau, le paquet IP est décapsulé du paquet du sous-réseau 2 et réencapsulé dans le paquet du sous-réseau 3. À son arrivée en B, le paquet du sous-réseau 3 est décapsulé, et le paquet IP est livré à la station terminale B.

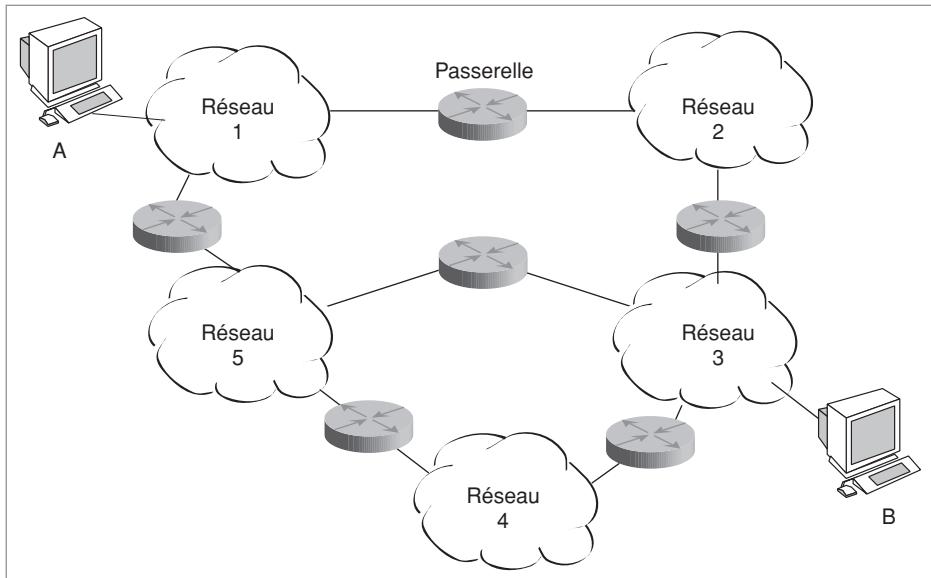


Figure 1-11. Structure du réseau Internet.

sous-réseau (en anglais LIS, ou *Logical IP Subnetwork*).— Nom donné à chaque réseau participant à Internet.

Un réseau Internet est donc formé d'un ensemble de sous-réseaux, aussi appelés LIS (*Logical IP Subnet*). L'acheminement dans chaque sous-réseau est un problème spécifique du sous-réseau et est transparent pour le réseau Internet proprement dit.

Les passerelles sont des organes qui décapsulent l'entité qui leur arrive pour retrouver le paquet IP puis réencapsulent ce paquet IP dans l'entité du réseau suivant. En fait, ces passerelles sont des routeurs. Leur objectif est de router les paquets IP dans la bonne direction en se servant de l'adresse IP qui se trouve dans le paquet IP lui-même.

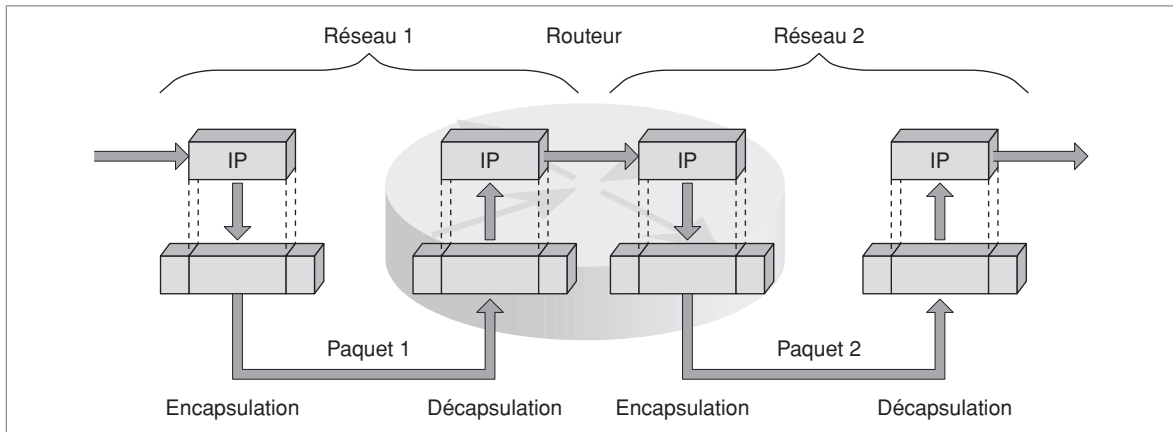


Figure 1-12. Encapsulation-décapsulation d'un paquet IP dans un réseau Internet.

L'encapsulation-décapsulation d'un paquet IP dans un réseau Internet est illustrée à la figure 1-12. Le paquet IP part de l'équipement terminal encapsulé dans l'entité du réseau 1 et utilise un protocole de niveau physique pour aller au premier routeur. Ce dernier récupère les bits et retrouve l'entité du sous-réseau 1, puis décapsule cette entité pour retrouver le paquet IP. Une fois le routage décidé grâce à l'adresse IP située dans le paquet, ce paquet IP est encapsulé dans l'entité du sous-réseau 2, et ainsi de suite.

Questions-réponses

Question 18.— Déterminer les encapsulations et décapsulations des paquets IP provenant d'un flot allant d'un PC vers un autre PC en transitant par deux sous-réseaux intermédiaires. Les PC possèdent une carte coupleur Ethernet, c'est-à-dire une carte que l'on insère dans l'ordinateur pour lui permettre de se connecter à un réseau local Ethernet. À la sortie du réseau Ethernet se trouve un équipement jouant le rôle de routeur et possédant deux cartes réseau : une carte Ethernet et une carte se connectant à un réseau A, utilisant une structure de paquet A. Le PC de destination possède également une carte coupleur se connectant au réseau A.

Réponse.— Les encapsulations et décapsulations sont illustrées à la figure 1-13.

coupleur (ou carte réseau).— Équipement que l'on ajoute à une station de travail pour accéder à un réseau.

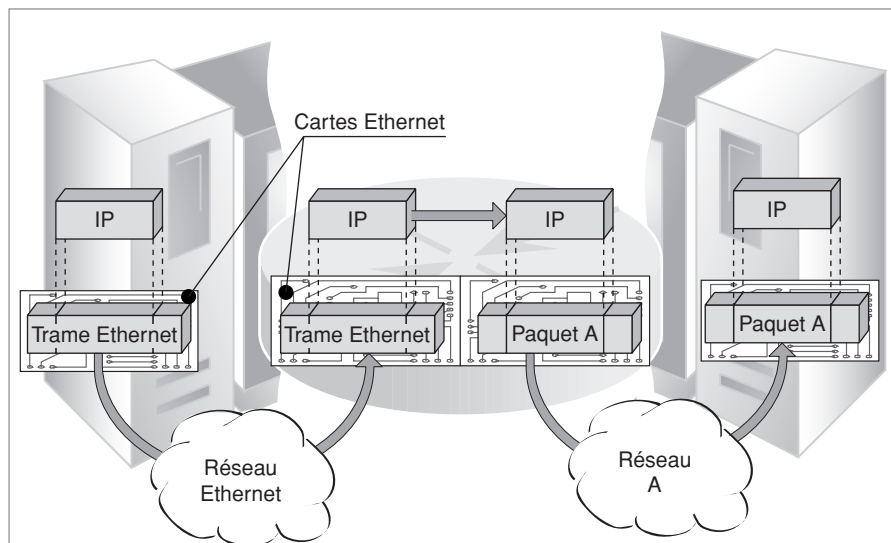


Figure 1-13. Traversée de deux sous-réseaux par un paquet IP.

Question 19. Dans un réseau Internet, un routeur doit posséder une table, appelée table de routage, de façon à diriger les paquets vers l'ensemble des destinations possibles. S'il existe 200 millions d'utilisateurs, cela pose-t-il problème ? Proposer une solution à ce problème.

Réponse.— Comme le paquet IP doit porter l'adresse complète du destinataire, il est nécessaire que le routeur soit capable de déterminer la bonne ligne de sortie pour aller vers n'importe quel destinataire. Si le nombre d'utilisateurs du réseau augmente de façon importante, comme c'est le cas avec Internet, les tables de routage deviennent très importantes et difficiles à manipuler, que ce soit pour aller rechercher l'information de routage ou pour la mettre à jour. Une solution consiste à hiérarchiser les adresses. Par exemple, tous les paquets portant l'une des adresses appartenant à un même *domaine*, un pays, par exemple, sont envoyés sur une même ligne de sortie. Dans ce cas, on agrège sur une même ligne l'ensemble des adresses de ce domaine.

table de routage.— Table contenant des informations relatives à la connexion d'un élément d'un réseau à d'autres nœuds et contrôlant les décisions de routage.

domaine.— Sous-ensemble d'adresses résultant du découpage d'une adresse hiérarchique en plusieurs sous-adresses.

Question 20.— *Un paquet IP est constitué d'un ensemble de données provenant d'un utilisateur, complété par un en-tête possédant les informations de contrôle. Montrer que, lors du transport d'une parole téléphonique compressée, la quantité d'information de l'utilisateur peut être relativement faible en comparaison de la taille totale du paquet IP. Proposer une solution à ce problème.*

Réponse. La parole téléphonique génère un flot d'un octet toutes les 125 μ s. Si la parole est compressée, le flot a un débit encore plus bas. Aujourd'hui on compresse jusqu'à des valeurs de 4 Kbit/s sans perte de qualité ou presque, ce qui donne, dans ce dernier cas, une moyenne d'un octet toutes les 2 ms. Comme la parole téléphonique possède une contrainte temporelle forte, il n'est pas possible d'attendre plus d'une cinquantaine de millisecondes, ce qui correspond à l'émission de seulement 25 octets. On en déduit que le nombre d'octets transportés risque d'être faible par rapport au nombre d'octets de contrôle. L'infrastructure du réseau est mal utilisée dans ce cas. Une solution pourrait consister à transporter plusieurs paroles téléphoniques simultanément dans le même paquet de sorte à atteindre un ensemble de données à transporter plus long que les zones de supervision et à permettre d'émettre le paquet rapidement, sans perte de temps pour le remplir.

Le paquet IP

Chaque paquet de chaque réseau transporte en son sein un paquet commun, le paquet IP (*Internet Protocol*).

Comme expliqué précédemment, l'encapsulation consiste à insérer un paquet IP à l'intérieur d'un bloc possédant une structure spécifique. En fait, comme la taille du paquet IP est fortement variable, cette taille peut ne pas être adaptée en étant, par exemple, trop grande. Dans ces circonstances, on commence par découper le paquet IP en fragments, et l'on encapsule chaque fragment dans un paquet spécifique.

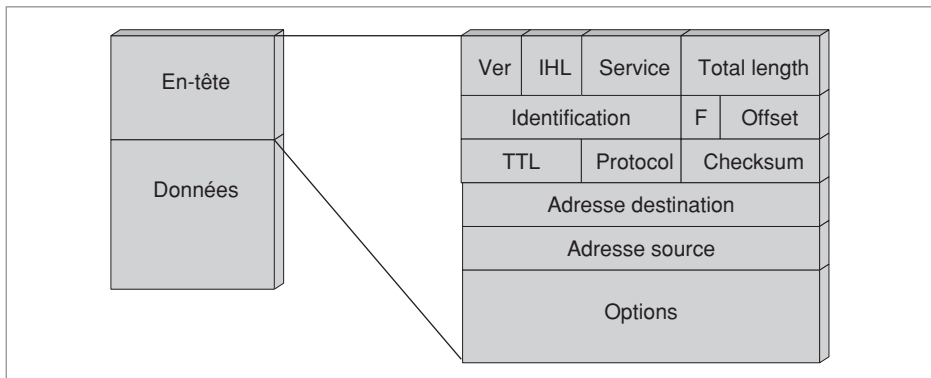


Figure 1-14. *Format du paquet IP.*

routeur.— Équipement permettant d'effectuer un transfert de paquets, qui utilise l'adresse se trouvant dans l'en-tête du paquet pour déterminer la meilleure route à suivre pour acheminer le paquet vers son destinataire.

Les nœuds intermédiaires où transitent les paquets s'appellent des *routeurs*. Ce système s'adapte parfaitement aux applications informatiques, qui acceptent généralement des contraintes temporelles lâches. En revanche, la qualité

nécessaire pour l'acheminement de la parole téléphonique ou de la vidéo est le plus souvent impossible à obtenir dans l'état actuel de la technologie.

L'une des raisons à cela tient au traitement premier arrivé-premier servi des paquets IP dans les nœuds de transfert, un petit paquet urgent qui se trouve derrière un gros paquet non urgent étant obligé d'attendre. De plus, Internet, en tant que réseau de réseaux, ne possède pas d'administrateur ayant une vision globale ni d'opérateur unique ayant une connaissance complète du réseau et étant capable de le gérer ou d'adapter ses infrastructures en fonction du nombre d'utilisateurs. Il est évident qu'une telle direction irait à l'encontre des raisons mêmes du succès d'Internet.

Il existe cependant des solutions pour réaliser un réseau Internet contrôlé. L'une d'elles consiste à utiliser le protocole IP dans un environnement privé. Nous obtenons alors un réseau *intranet*, conçu pour traiter l'information à l'intérieur d'une entreprise ou d'une organisation. La deuxième génération de réseaux IP, que nous étudions dans la suite de cet ouvrage, introduit des contrôles internes au réseau autorisant le support de la qualité de service, c'est-à-dire la possibilité pour un utilisateur de demander au réseau le transport de ses paquets avec une garantie déterminée.

La compatibilité d'un réseau avec la structure d'Internet demande une condition préalable : l'installation par tous les utilisateurs du même logiciel de communication IP, depuis la station de travail jusqu'aux machines centrales. L'intelligence permettant de contrôler les paquets qui transitent dans le réseau se trouve dans les équipements terminaux. Ces éléments situés aux extrémités du réseau doivent adapter leurs applications à l'état du réseau par une *compression* plus ou moins importante.

intranet. – Réseau conçu pour traiter l'information à l'intérieur d'une entreprise ou d'une organisation et utilisant le protocole IP de façon privée.

compression. – Réduction par codage de la taille d'un ensemble de données, en vue de limiter les besoins en capacité.

Questions-réponses

Question 21. – On indique dans la structure du paquet IP un temps de vie du paquet, ou TTL (*Time to Live*), qui correspond à un temps maximal avant que le paquet ne soit détruit ; pourquoi ?

Réponse. – Si un paquet possède une erreur dans l'adresse de destination, il risque de tourner en rond sans que personne ne le détruise. La raison d'être du champ TTL est de détruire les paquets qui sont perdus.

Question 22. – Pourquoi un réseau intranet est-il plus facile à contrôler que le réseau Internet ?

Réponse. – Un réseau intranet est plus facile à contrôler que le réseau Internet parce qu'il est privé et que l'on en connaît beaucoup mieux les utilisateurs.

1

On considère un réseau à transfert de paquets.

- a** Montrer que les deux méthodes de transfert décrites ci-après sont très différentes :
1. Lorsqu'un paquet arrive dans un nœud, il est mis en attente jusqu'à ce que tout le paquet soit mémorisé dans le nœud puis transféré vers la ligne de sortie. Cette méthode s'appelle *store-and-forward*.
2. Le paquet est transféré petit à petit vers la ligne de sortie au fur et à mesure de l'arrivée des octets, avec tout de même un peu de retard pour obtenir l'adresse du récepteur avant de commencer le transfert mais sans attendre l'arrivée de la fin du paquet. Cette méthode s'appelle *cut-through*.
- b** Quel est l'avantage du *store-and-forward* ?
- c** Quel est l'avantage du *cut-through* ?

2

On veut comparer un réseau à commutation de circuits et un réseau à transfert de paquets.

- a** Un paquet envoyé sur un circuit a-t-il le choix de sa destination ?
- b** Un paquet envoyé en transfert de paquets a-t-il le choix de sa destination ?
- c** Un nœud peut-il être saturé en commutation de circuits ? Et en transfert de paquets ?
- d** Pourquoi est-ce plus facile d'acheminer de la parole téléphonique sur un circuit que dans un transfert de paquets ?

3

On considère un réseau à transfert de paquets composé de trois nœuds en série, A, B et C. Supposons que le temps de transfert à l'intérieur d'un nœud, c'est-à-dire le temps entre le moment où le paquet est complètement arrivé dans le nœud et le moment où il est dans la ligne de sortie, prêt à être émis vers le nœud suivant, soit nul.

- a** Montrer que le temps de réponse du réseau est la somme des temps de propagation et des temps d'attente dans les lignes de sortie du nœud.
- b** Pourquoi le temps de transit d'un paquet est-il variable ?
- c** Le flux de paquets va du nœud A au nœud C. Si le nœud C est congestionné, que se passe-t-il ?
- d** Le réseau Internet possède une technique de transfert de paquets appelée routage, qui consiste à router les paquets en relation avec une table de routage. En d'autres termes, lorsqu'un paquet arrive dans un nœud, on examine son adresse de destination et l'on détermine la ligne de sortie du nœud. Montrer que cette solution utilise des chemins fixes si la table de routage n'est pas dynamique. Montrer que le fait de rendre la table de routage dynamique complexifie les problèmes de routage.