Commutation, routage et techniques de transfert

Les éléments des réseaux qui prennent en charge les paquets sont appelés des nœuds, ou encore des nœuds de transfert, car ils transfèrent des paquets d'une ligne d'entrée vers une ligne de sortie. Ces nœuds de transfert peuvent être des routeurs ou des commutateurs. Routeurs et commutateurs font l'objet d'un débat continuel car ils symbolisent deux manières opposées d'acheminer l'information à l'intérieur d'un réseau maillé. Les deux solutions présentent bien sûr des avantages et des inconvénients, notamment souplesse pour le routage et puissance pour la commutation.

La technique de transfert ATM utilise une commutation, tandis qu'Internet préfère le routage. Le transfert Ethernet se place à mi-chemin, avec un routage fixe qui ressemble à une commutation, d'où son nom de commutation Ethernet.

Dans ce chapitre, le mot paquet désigne l'entité à commuter ou à router. Il peut aussi bien s'agir d'une trame que d'un paquet.

Routeurs et commutateurs

Les commutateurs acheminent les paquets vers le récepteur en utilisant des références, également appelées identificateurs ou étiquettes (en anglais *labels*). Une référence est une suite de chiffres accompagnant un bloc (trame, paquet, etc.) pour lui permettre de choisir une porte de sortie au sein d'une table de commutation. Par exemple, si 147 est une référence, tous les paquets se présentant sur une porte d'entrée déterminée et portant la valeur 147 sont dirigés vers la même ligne de sortie. Les routeurs utilisent une table de routage pour diriger les paquets vers leur destination.

Ces deux possibilités sont assez différentes puisque, dans la commutation, le chemin que suivent les paquets de nœud en nœud est toujours le même, alors que, dans le routage, le paquet est routé à l'entrée de chaque nœud grâce à l'adresse complète du récepteur.

Une fois le chemin ouvert, les mesures montrent que, pour une puissance donnée, un commutateur atteint un débit dix à cinquante fois supérieur à celui d'un routeur. Cette différence a toutefois tendance à se réduire avec l'apparition des routeurs gigabit, dits gigarouteurs.

La différence principale entre le routage et la commutation réside dans le type d'information de supervision transporté par le paquet. Dans un routeur, le paquet doit posséder l'adresse complète du destinataire. La décision de router prend donc du temps, puisqu'il faut non seulement trouver la bonne ligne de sortie à l'aide de la table de routage mais encore et surtout gérer cette table de routage. Dans un commutateur, la table de commutation indique la ligne de sortie en fonction de la référence transportée par le paquet. Le paquet ne comporte qu'une seule référence, qui indique une file de sortie du nœud, laquelle est toujours la même, indépendamment de l'état du réseau. En cas de cassure de ligne ou de panne d'un nœud, un nouveau routage intervient, qui détermine un nouveau chemin.

Pour mettre en place le chemin que suivront tous les paquets, une signalisation est nécessaire. Cette signalisation s'effectue grâce à un paquet spécifique, parfois appelé paquet d'appel. Dans un commutateur, c'est la table de routage qui dirige le paquet d'appel nécessaire à l'établissement du chemin. Le commutateur possède donc à la fois une table de routage et une table de commutation.

Pour obtenir de bonnes performances, il faut essayer de limiter le nombre d'entrées dans les tables de routage et de commutation. Une valeur inférieure à 10 000 entrées garantit une vitesse acceptable. Lorsque la commutation ne s'effectue que sur une partie de la référence, le commutateur s'appelle un brasseur. Dans le monde ATM, le temps de traversée d'un nœud doit rester négligeable par rapport au temps de transit du réseau, de façon que ce dernier soit à peu près égal au temps de propagation. Le temps de commutation doit donc être négligeable.

La commutation permet donc d'acheminer des informations au travers d'un réseau en les transportant de nœud en nœud suivant un chemin prédéfini, appelé circuit virtuel. Ce circuit virtuel n'est autre qu'une succession de références que tous les paquets d'un même flot doivent suivre, comme s'ils étaient sur un circuit. Ce circuit est dit virtuel parce qu'il n'appartient pas de façon exclusive au couple émetteur-récepteur, à la différence d'un circuit véritable.

Fonctionnalités des routeurs et des commutateurs

Les nœuds de transfert doivent être capables de supporter aussi bien les trafics homogènes que les trafics sporadiques. Le fait d'intégrer des services dont les objectifs et les critères de performance peuvent être très différents nécessite l'utilisation de priorités. C'est la raison pour laquelle les paquets sont dotés d'informations de priorité, qui sont traitées dans la file d'attente d'entrée des routeurs et commutateurs.

Les fonctions principales d'un nœud de transfert sont les suivantes :

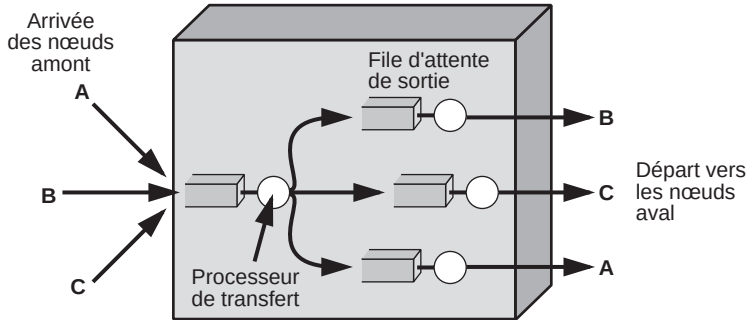
- analyse et traduction de l'en-tête du paquet ;
- commutation ou routage ;
- multiplexage des paquets sur la sortie déterminée.

L'information utilisateur transportée dans les paquets est transférée de manière asynchrone, c'est-à-dire selon un mode de transmission des données dans lequel l'instant d'émission de chaque caractère ou bloc de caractères est arbitraire. Puisque

les communications sont asynchrones et qu'un grand nombre de chemins peuvent partager une même liaison, le nœud de transfert doit être capable de gérer au mieux ses ressources. Ces dernières sont constituées par les mémoires tampons, les files de sortie et la file d'entrée du nœud.

La figure 2.1 illustre la façon de traiter les paquets dans la file d'entrée d'un nœud de transfert, qui peut être un routeur ou un commutateur. Les paquets proviennent de trois nœuds amont, A, B, C. Les paquets sont ensuite dirigés vers une première file d'attente, qui a pour fonction de décider du choix de la ligne de sortie. Une fois la décision prise, le paquet est dirigé vers une des trois files de sortie correspondant aux trois nœuds A, B, C. Normalement, un paquet entrant par l'une des entrées, A par exemple, ne ressort pas vers le même nœud A car cela générerait une boucle dans le routage.

Figure 2.1
Fonctionnement d'un nœud de transfert



Le nœud de transfert examine l'en-tête de chaque paquet pour identifier le port de sortie indiqué. Grâce à sa table de commutation ou de routage, il effectue ensuite le transfert du paquet vers la bonne file de sortie. Le choix de la liaison de sortie est défini à partir soit d'une table de commutation, comme dans le cas de l'ATM, soit d'une table de routage, qui peut être statique ou dynamique, comme dans le cas du protocole IP. Des paquets de contrôle, de supervision et de gestion sont également pris en charge par l'unité centrale du nœud de transfert.

Dans un commutateur, la ligne de sortie est déterminée par la référence contenue dans l'en-tête du paquet. Des mécanismes de contrôle de collision permettent aux paquets provenant de différentes entrées d'accéder en parallèle à la première file d'attente du nœud, parfois appelée file de commutation. Le mot commutation a longtemps désigné le transfert d'un paquet d'une ligne d'entrée vers une ligne de sortie. Aujourd'hui, comme cette fonction de transfert recouvre deux modes, le routage et la commutation, il est préférable d'appeler cette fonction un transfert, de sorte à ne pas utiliser le mot commutation lorsqu'on a affaire à un routage.

Il existe une diversité de solutions pour réaliser un nœud de transfert. Dans tous les cas, une fonction de stockage doit se trouver à l'entrée ou à la sortie, ou encore le long de la chaîne de transfert. À l'intérieur du nœud, diverses techniques de routage peuvent être mises en œuvre, telles que circuit virtuel, autoroutage ou datagramme. L'efficacité de ces solutions est assez comparable en matière de contrôle d'accès, de capacité de diffusion, de perte de cellules et de complexité technique.

Diverses méthodes permettent d'aiguiller les paquets et de gérer les mémoires tampons. Des fonctions additionnelles, telles que la correction d'erreur ou le contrôle de flux, sont souvent implémentées dans les nœuds de transfert.

Les commutateurs

L'un des atouts majeurs des systèmes de commutation réside dans l'architecture des commutateurs. Plusieurs types d'architecture ont été proposés, dont les trois principaux sont dits à mémoire partagée (shared-memory), à support partagé (shared-medium) et à division spatiale (space-division). Étant donné les vitesses élevées des lignes de transmission et la petite taille des paquets, appelés cellules, les commutateurs doivent pouvoir commuter les paquets à des débits extrêmement élevés tout en étant capables de traiter plusieurs milliers de circuits virtuels et donc de gérer des tables de commutation à plusieurs milliers d'entrées. De tels commutateurs sont réalisés de façon matérielle plutôt que logicielle.

Les différents commutateurs se distinguent les uns des autres en fonction de critères de fonctionnement internes, tels que l'architecture, le type de liaison, la technique de commutation, le contrôle et la gestion des blocages par les mémoires tampons :

- Les architectures internes se différencient par le nombre d'étapes à traverser. Une étape peut être considérée comme un bloc monolithique, traversé en une seule tranche de temps de base. Plus le nombre d'étapes est faible, plus le temps de réponse est court.

- La liaison à l'intérieur du commutateur de paquets peut être soit dédiée, soit statistique. Sur une liaison dédiée, les paquets vont d'une porte d'entrée à une porte de sortie, en transitant toujours par le même chemin. Dans le cas d'une liaison statistique, tout paquet est apte à emprunter une liaison quelconque à l'intérieur du commutateur. Le routage est alors déterminé par un algorithme de contrôle.

- Les techniques de commutation interne peuvent être classées en deux grandes catégories : la répartition dans l'espace et la répartition dans le temps. Dans une répartition dans l'espace, plusieurs liaisons parallèles peuvent être mises en place pour véhiculer les paquets. Dans une répartition dans le temps, les paquets se partagent les ressources dans le temps. Il peut aussi y avoir superposition des deux techniques de commutation, plusieurs liaisons mettant chacune en œuvre un multiplexage temporel.

- Le contrôle du commutateur s'effectue à l'aide d'algorithmes de gestion des ressources. Ces algorithmes concernent, entre autres, le routage des paquets et les contrôles de flux et de congestion.

- À l'intérieur du commutateur, il peut être nécessaire de mémoriser des paquets en cas de blocage. Un blocage apparaît lorsque deux paquets entrent en compétition pour obtenir une même ressource. Dans ce cas, il faut mettre un paquet en attente. Les mémoires peuvent se situer à l'entrée, à la sortie ou en différents points à l'intérieur du commutateur. Il existe des commutateurs avec blocage et d'autres sans.

En plus de ces fonctionnalités, certains commutateurs, dits haut débit, peuvent supporter à la fois des services bande étroite et large bande. Ils doivent satisfaire pour cela aux contraintes suivantes : haut débit, faible délai de commutation, faible taux de perte de cellules, possibilité de communication en multipoint, modularité et extensibilité et enfin faible coût d'implémentation. Ils doivent en outre être pourvus de fonctions de distribution et de priorité.

Les routeurs

Pendant de longues années, les routeurs ont été considérés comme des machines lentes et complexes à gérer. La fonction de routage exige en effet la connaissance de l'emplacement de tous les destinataires pouvant passer par le même nœud de façon à pouvoir leur router les paquets, cet emplacement étant déterminé par l'adresse complète du destinataire transportée dans le paquet. De plus, la table de routage étant une ressource partagée, elle doit pouvoir répondre à toutes les demandes émises par les paquets en mémoire.

Une première solution aux problèmes de vitesse et d'accès à la table de routage a consisté à réduire sa taille à moins de 10 000 entrées, c'est-à-dire 10 000 destinataires. Chaque ligne indique, en fonction d'une adresse de destination, la ligne de sortie sur laquelle il faut émettre le paquet. Pour restreindre le nombre de destinations, on agrège souvent les adresses, comme nous le verrons au chapitre 26.

Pour accroître encore les performances des routeurs, on a implémenté dans les composants électroniques installés dans le cœur des routeurs des techniques développées pour les commutateurs et aujourd'hui totalement maîtrisées. Cette solution a été rendue possible par la chute des prix des composants des commutateurs, conséquence de leur miniaturisation.

La figure 2.2 illustre le transfert d'un paquet arrivant sur une ligne d'entrée i et acheminé vers une ligne de sortie j. La figure ne décrit qu'un seul nœud de commutation, possédant *n* lignes d'entrée et donc également *n* lignes de sortie. Une fois la ligne de sortie j choisie grâce à la table de routage située dans le routeur, le paquet est transporté *via* le cœur de commutation vers la mémoire de sortie j, dans laquelle sont enregistrés les paquets en attente d'être émis sur la ligne physique. Ces paquets forment une file d'attente pour être émis dans un ordre déterminé par leur priorité, si des priorités existent, sinon suivant la règle « premier arrivé premier sorti ».

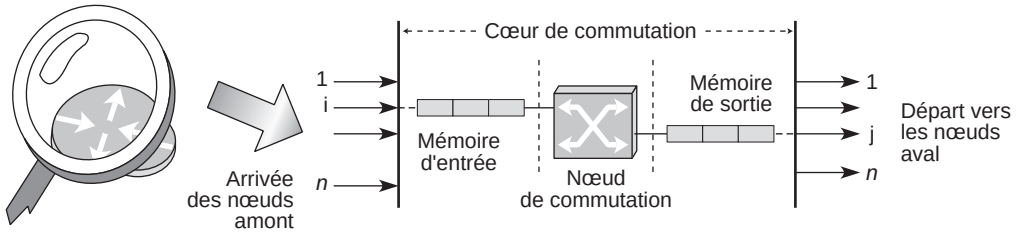


Figure 2.2

Transfert de paquets dans un routeur

La table de routage est gérée par un processeur se trouvant dans le routeur. Les accès à la table de routage sont distribués entre toutes les files d'entrée. Cette architecture est toutefois celle d'un routeur relativement puissant.

Les routeurs-commutateurs

Certaines applications sont mieux prises en compte par un routage et d'autres par une commutation. Par exemple, la navigation dans une base de données Web distribuée au niveau mondial est préférable dans un environnement routé. À l'inverse, la commutation

est mieux adaptée au transfert de gros fichiers. Ces constatations ont incité beaucoup d'industriels à optimiser l'acheminement des paquets en proposant des solutions mixtes, appelées routeurs-commutateurs, superposant dans une même boîte un commutateur et un routeur.

Grâce à leur architecture double, les routeurs-commutateurs peuvent répondre aux demandes de commutation ou de routage des clients du réseau. Dans le premier cas, un paquet de signalisation met en place un circuit virtuel, que tous les paquets du flot doivent suivre. Dans le second, chaque paquet est livré à lui-même et, grâce au routage, arrive au destinataire.

Le choix de l'utilisateur n'est pas toujours simple, puisqu'il ne connaît pas forcément la longueur de son flot. Même s'il le sait, il lui faut pouvoir l'indiquer au réseau de façon que celui-ci prenne la bonne décision, entre routage et commutation. En règle générale, le choix se fait à partir du type de l'application transportée. Par exemple, la consultation de pages Web donne automatiquement naissance à un flot routé, tandis que les paquets d'un transfert de fichiers sont automatiquement commutés.

De très nombreux produits de type routeur-commutateur ont été commercialisés sur le marché des télécommunications. Les premiers d'entre eux étaient les IP-switch (Ipsilon), les Tag-Switch (Cisco Systems), les commutateurs ARIS (IBM), les Fast-IP switch (3Com), etc. Tous ces produits étant incompatibles entre eux, plusieurs organismes de normalisation ont travaillé sur un standard de référence. C'est celui de l'IETF (Internet Engineering Task Force), l'organisme de normalisation du monde Internet, qui, sous le nom de MPLS (MultiProtocol Label-Switching), est devenu la norme de référence. Ce protocole est présenté en détail au chapitre 19.

Les techniques de transfert

Il existe cinq grandes techniques de transfert : la commutation de circuits, le transfert de messages, le transfert de paquets, la commutation de trames et la commutation de cellules. Le transfert est compatible à la fois avec la commutation et le routage tandis que la commutation ne fonctionne qu'en mode commuté.

Historiquement, les réseaux à commutation de circuits ont été les premiers à voir le jour. Le réseau téléphonique en est un exemple. Les commutations de messages et de paquets sont venus ensuite pour optimiser l'utilisation des lignes de communication dans les environnements informatiques. Enfin, deux nouveaux types de commutation, la commutation de trames et la commutation de cellules, ont été mis au point pour augmenter les débits sur les lignes et prendre en charge les applications multimédias. Nous les présentons en détail respectivement aux chapitres 14 et 15.

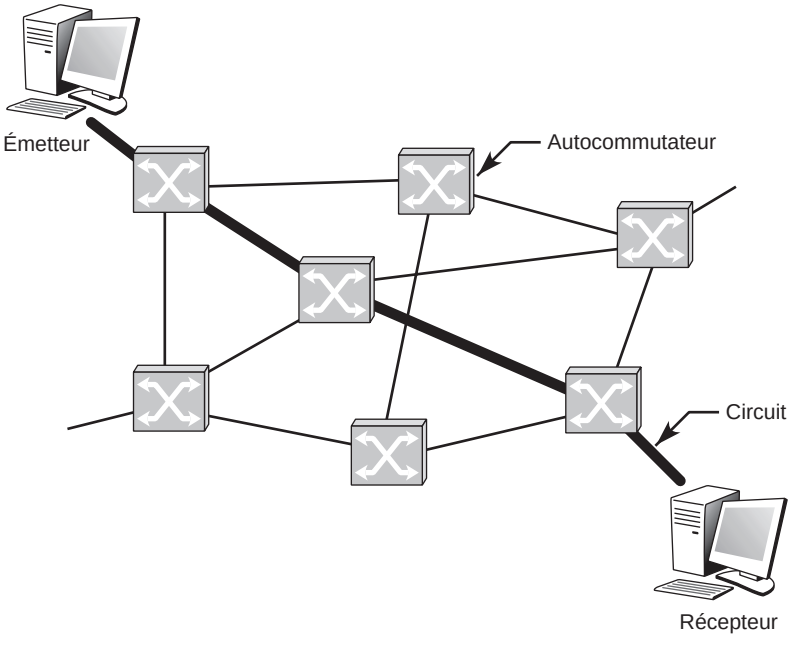
On peut considérer ces nouvelles formes de commutation comme des évolutions de la commutation de paquets. Le réseau de transmission comporte des nœuds de transfert, qui peuvent être soit des commutateurs de paquets, ou nœuds de commutation, soit des routeurs, capables de faire progresser la communication vers les destinataires.

La commutation de circuits

Dans la commutation de circuits, un circuit matérialisé est construit entre l'émetteur et le récepteur. Ce circuit n'appartient qu'aux deux équipements terminaux qui communiquent entre eux. La figure 2.3 illustre un circuit traversant trois autocommutateurs, qui

sont les équipements capables de mettre bout à bout des segments de circuits pour former un seul circuit de bout en bout. Un excellent exemple de commutation de circuits est le réseau téléphonique. Pour transporter des données sur un circuit, il faut se servir d'un modem *(voir le chapitre 5).*

Figure 2.3
Réseau à commutation de circuits



Le circuit doit d'abord être établi pour que des informations puissent transiter. Le circuit dure jusqu'au moment où l'un des deux abonnés interrompt la communication. Si les deux correspondants n'ont plus de données à se transmettre pendant un certain temps, le circuit reste inutilisé, et les différentes liaisons entre autocommutateurs réalisant le circuit sont inemployées. Pour augmenter le taux d'utilisation des liaisons, on a cherché à concentrer sur une même liaison plusieurs communications.

Lorsque de nombreuses communications utilisent une même liaison, une file d'attente se forme, et il est nécessaire de prévoir des zones de mémoire pour retenir les données en attendant que la liaison redevienne disponible. Le fait d'augmenter l'utilisation des liaisons accroît la complexité du système de contrôle, qui devient beaucoup plus lourd, même si son débit est meilleur.

Le transfert de messages

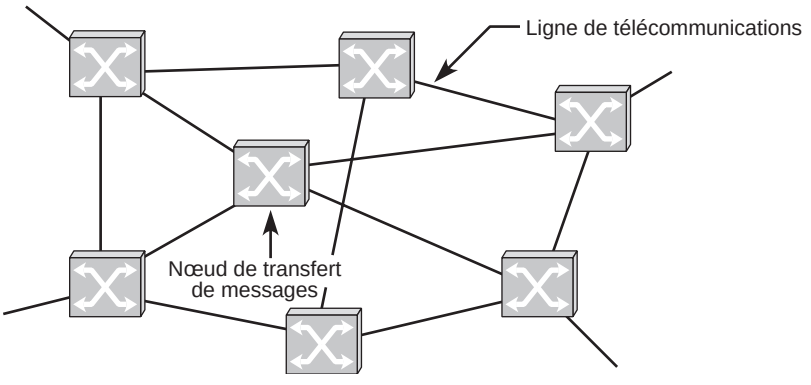
Un message est une suite d'informations formant un tout logique pour l'expéditeur et le destinataire, comme un fichier complet, une ligne saisie sur un terminal, un secteur de disque, etc.

Un réseau à transfert de messages se présente sous la forme illustrée à la figure 2.4. C'est un réseau maillé de nœuds. Le message est envoyé de nœud en nœud jusqu'au destinataire. Ce message ne peut toutefois être envoyé au nœud suivant qu'une fois qu'il a été reçu complètement et correctement par le nœud précédent. Le temps de réponse, même

dans le cas le plus favorable, est généralement très long puisqu'il correspond à la somme des temps de transmission de chaque nœud, comme l'illustre la figure 2.5.

Figure 2.4

Réseau à transfert de messages



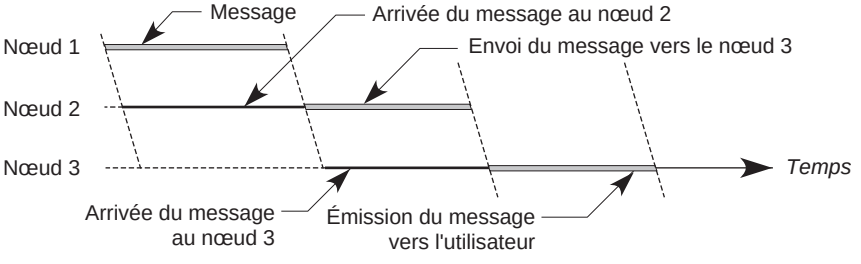


Figure 2.5

Temps de réponse dans le transfert de messages

Pour mémoriser les messages en attendant qu'ils soient correctement stockés dans le nœud suivant, il est nécessaire d'insérer des tampons aux nœuds intermédiaires. Il faut également un système de gestion des transmissions qui accuse réception des messages correctement reçus et demande la retransmission des messages erronés. De plus, comme la capacité des mémoires intermédiaires est limitée, il faut introduire un contrôle sur le flux des messages pour éviter tout débordement. Des politiques de routage des messages peuvent être introduites pour aider à sécuriser les transmissions et faire en sorte que, si une liaison tombe en panne, un autre chemin puisse être trouvé.

Si les messages sont trop longs, ils peuvent être stockés sur disque aux nœuds intermédiaires. Dans ce cas, le temps de réponse de la transmission augmente considérablement. Il est donc très difficile de transmettre correctement de très longs messages. Par exemple, pour un taux d'erreur de 10^{-5} par bit, c'est-à-dire si en moyenne un bit sur 10^5 est erroné, un message de 100 000 octets n'a qu'une probabilité de 0,000 3 d'arriver correctement.

Les deux types de transferts de messages déployés sont la commutation de messages et le routage de messages. Dans le premier cas, les commutateurs de messages utilisent la référence qui se trouve dans l'en-tête du message pour effectuer la commutation. Dans le second cas, les routeurs de messages utilisent l'adresse complète du destinataire qui se trouve dans l'en-tête du message.

Dans la réalité, ces techniques de transfert de messages ne sont plus utilisées et sont remplacées par des techniques de transfert de paquets.

Le transfert de paquets

Pour accélérer la vitesse de transmission et simplifier les reprises sur erreur, on a vu apparaître, au début des années 70, le concept de réseau à transfert de paquets. Le paquet est une suite d'informations binaires dont la taille ne peut dépasser une valeur déterminée à l'avance, de l'ordre de 1 000 à 2 000 bits. Le découpage en paquets des messages des utilisateurs facilite grandement les retransmissions.

La figure 2.6 illustre le comportement dans le temps d'un réseau à transfert de messages comparé à celui d'un réseau à transfert de paquets. On constate que le temps de traversée, ou de transit, du réseau à transfert de paquets est de loin le plus court. Les paquets étant beaucoup plus petits que les messages, ils peuvent être retransmis vers le nœud suivant plus rapidement.

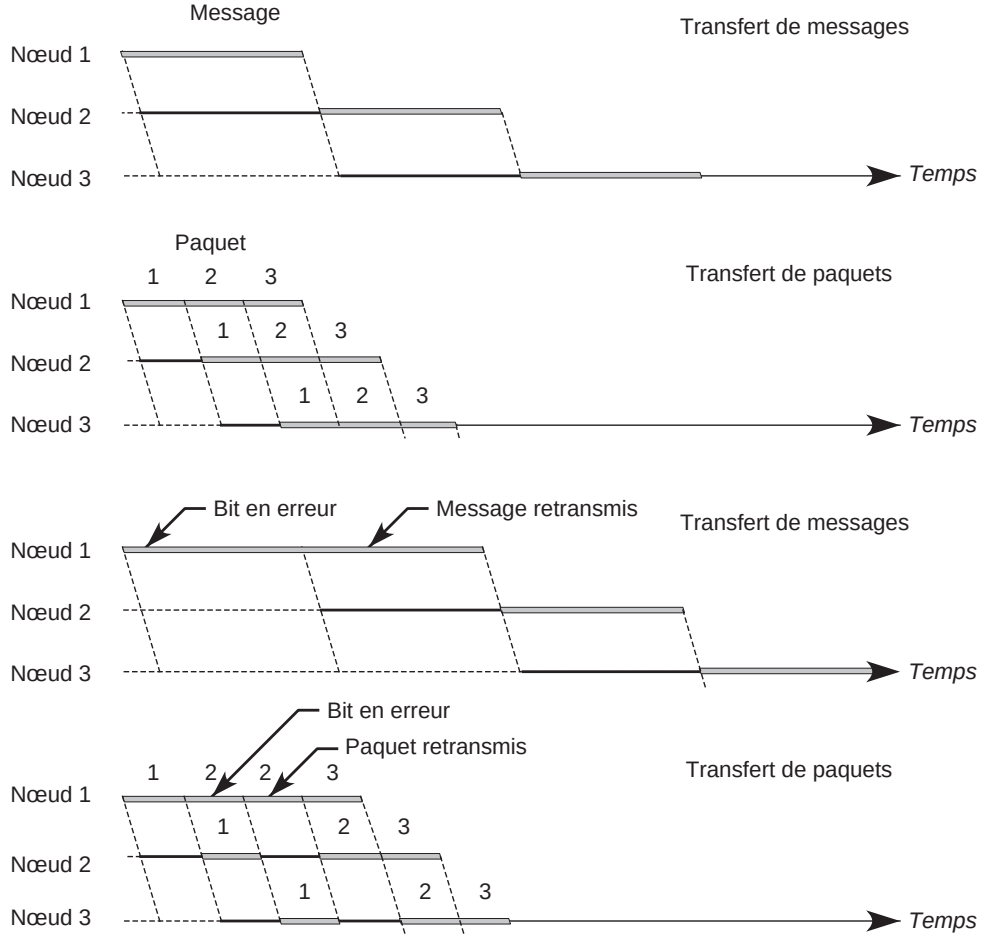


Figure 2.6

Temps de réponse comparés de la commutation de paquets et de la commutation de messages

Dans le transfert de paquets, les paquets constituant le message de l'utilisateur sont envoyés indépendamment les uns des autres. Les liaisons entre les nœuds les émettent au fur et à mesure de leur arrivée dans le nœud. Les paquets de plusieurs messages peuvent de la sorte être multiplexés temporellement sur une même liaison, comme illustré à la figure 2.7.

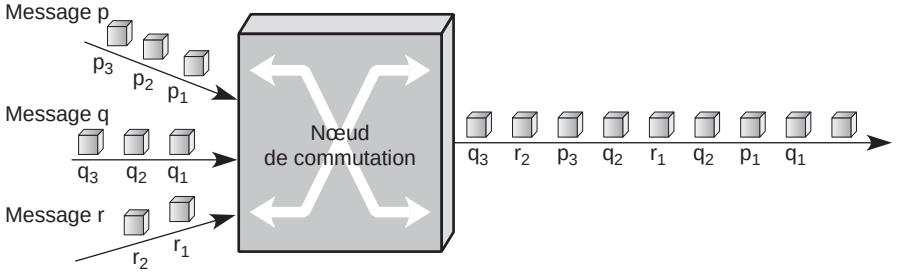


Figure 2.7
Multiplexage temporel des paquets sur une même liaison

Le rôle des nœuds est d'aiguiller les paquets vers la bonne porte de sortie, déterminée par une table de routage ou une table de commutation. À la figure 2.7, nous supposons que les messages p, q et r sont dirigés vers la même ligne de sortie. Cette représentation serait différente si nous avions une table de routage dynamique, permettant de modifier le routage entre l'émission de deux paquets d'un même message. Dans ce cas, il faudrait représenter au moins deux lignes de sortie. Dans un routage, les liaisons entre nœuds ne sont pas affectées explicitement à une paire source-destination, à la différence de la commutation de circuits.

Le fait que les blocs d'information soient de petite taille permet une gestion plus simple des paquets que dans le transfert de messages, surtout au niveau des reprises sur erreur. En revanche, des problèmes peuvent survenir lors du réassemblage des paquets pour reformer le message original. Si des paquets prennent des routes distinctes et que l'un d'eux se perde, par exemple, il faut le plus souvent effectuer une reprise de la transmission de l'ensemble du message. Si l'on gagne en temps de réponse et en performance, on complexifie en contrepartie l'architecture en ajoutant au niveau massage une couche de protocoles supplémentaire, le niveau paquet.

Deux techniques de transfert de paquets ont déjà été explicitées : la commutation de paquets et le routage de paquets. Internet est un exemple de réseau à transfert de paquets, et plus précisément à routage de paquets, dans lequel les paquets sont de taille variable et indépendants les uns des autres. Ils peuvent ainsi suivre des routes distinctes et arriver dans le désordre. D'autres réseaux, comme ATM ou X.25, utilisent la commutation et demandent que les paquets suivent toujours un même chemin. De ce fait, les paquets arrivent dans l'ordre, mais au prix d'une certaine complexité provenant de la mise en place du chemin et des références associées.

Les solutions mixtes circuits-paquets

La commutation de circuits et le transfert de paquets correspondent à des techniques de transfert très différentes, conçues pour des applications spécifiques. Il est toutefois possible

dans la plupart des cas d'émettre des paquets sur un circuit et de les véhiculer vers leur destination.

Au début des années 80, on fondait beaucoup d'espoirs sur la mise en place de circuits suffisamment importants pour faire aussi bien de la commutation de circuits que du transfert de paquets. On s'est vite rendu compte que cette solution présentait des inconvénients majeurs, résultant de la mauvaise utilisation du circuit lorsqu'on émet des paquets et de la difficulté à réaliser une liaison multipoint, dans laquelle un émetteur doit envoyer de l'information à plusieurs points simultanément.

Il est envisageable de réaliser une commutation de circuits sur un transfert de paquets, par exemple pour intégrer voix et données, même si c'est une solution généralement difficile à mettre en œuvre. Supposons que l'on soit capable de limiter le temps de traversée du réseau à transfert de paquets à une valeur *T.* Les données provenant du circuit sont mises dans un paquet, lequel est émis dans le réseau pourvu de sa date *t* d'émission. À la sortie, le paquet est conservé jusqu'à la date *t* + *T.* Les données du paquet sont ensuite remises sur le circuit ainsi reconstitué. Toute la difficulté de cette technique consiste à assurer un temps de traversée limité par la valeur *T,* tous les paquets devant mettre moins d'un temps *T* pour traverser le réseau. Cette limitation est ordinairement impossible sur un réseau classique à transfert de paquets, qui ne garantit aucun temps de traversée.

Les concepteurs des nouvelles générations de réseaux essaient de trouver des solutions à ce problème afin de garantir que tous les paquets traversent le réseau en un temps de transit inférieur à *T.* La commutation de cellules ATM *(voir plus loin dans ce chapitre)* et le transfert de paquets IP dans la nouvelle génération IPv6, introduisant de la qualité de service *(voir le chapitre 7)*, sont considérés comme des solutions apportant cette garantie de transport des applications qui transitent aujourd'hui sur des circuits, comme la parole téléphonique. Cette nouvelle génération est de surcroît bien adaptée au transport de tous les types d'information par l'intégration des différents médias dans une même structure de paquets.

La commutation multicircuit et la commutation rapide de circuits

Pour réaliser une intégration de services, c'est-à-dire transporter plusieurs applications simultanément, sur une technique circuit, il est possible d'effectuer une commutation multicircuit consistant à mettre à la disposition de l'utilisateur non pas un circuit mais plusieurs simultanément.

Les circuits standards ont des débits de 64 Kbit/s, 2 Mbit/s, etc. Les canaux multicircuit construits jusqu'à présent consistent en la superposition de circuits selon une technique de multiplexage temporel. Les premières techniques de multiplexage temporel ont été standardisées en 1963 sous le nom de « hiérarchie plésiochrone ». Cette dernière correspond à une émission synchrone mais avec des instants de démarrage asynchrones. Nous examinons en détail cette solution au chapitre 13.

L'inconvénient majeur d'un transfert de paquets effectué sur un circuit provient de la mauvaise utilisation du circuit. En effet, les données informatiques sont disponibles par à-coup et par paquet de taille fortement variable dans le temps. Au contraire, un circuit est disponible en permanence et permet le transport de paquets réguliers et de longueur constante. Si l'on veut optimiser l'utilisation d'un circuit dans un contexte informatique, il faut être capable de libérer le circuit pendant les périodes de temps où il ne transporte pas de paquet. C'est le rôle de la commutation rapide de circuits.

Dans ce contexte, le circuit est mis en place pour une durée limitée. Pour cela, on utilise des étiquettes permettant de reformer instantanément le circuit lors de l'arrivée de nouvelles données. De ce fait, on trouve des schémas d'utilisation du circuit tels que celui illustré à la figure 2.8.

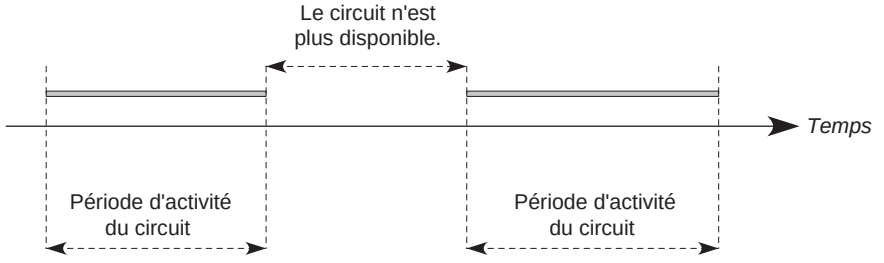


Figure 2.8
Commutation rapide de circuits

De même que pour les techniques de commutation multicircuit, il est difficile de gérer des circuits dans le temps. La commutation est temporelle au lieu d'être spatiale. Chaque fois qu'on libère de la bande passante, il faut, pour en optimiser l'utilisation, réallouer les bandes disponibles. Cette opération est au moins aussi complexe que celle qui consiste à réaliser une commutation de circuits au-dessus d'une commutation de paquets. C'est la raison pour laquelle cette technique n'a eu que peu de succès jusqu'à présent.

Le transfert de trames

Le transfert de trames est une extension du transfert de paquets. Un paquet ne peut être transmis sur une ligne physique car il ne comporte aucune indication signalant l'arrivée des premiers éléments binaires qu'il contient. La solution pour transporter un paquet d'un nœud vers un autre consiste à placer les éléments binaires dans une trame, dont le début est reconnu grâce à une zone spécifique, appelée drapeau (flag) ou préambule, que nous détaillons au chapitre 6.

Un transfert de trames est donc similaire à un transfert de paquets, à cette différence près que les nœuds de transfert sont plus simples. En effet, dans un transfert de paquets, on encapsule le paquet dans une trame, puis on envoie la trame vers le nœud suivant. À réception de la trame, ce nœud la décapsule pour récupérer le paquet et transfère le paquet à sont tour en l'encapsulant dans une trame, etc. Dans un transfert de trames, il n'y a ni encapsulation ni décapsulation, et il suffit d'envoyer la trame. Lorsque la trame arrive au nœud suivant, la zone portant l'adresse ou la référence est examinée, ce qui permet d'émettre la trame vers le nœud suivant. Comme les transferts de messages ou de paquets, les transferts de trames peuvent être de deux types : commutation ou routage. Dans le premier cas, l'en-tête de la trame contient une référence, et dans le second l'adresse complète du récepteur.

Les transferts de trames sont en très grande majorité des commutations, car ils utilisent des références. Les trois principaux transferts sont l'ATM, le relais de trames et la commutation Ethernet. La commutation de trames ATM est si particulière qu'on lui a donné le nom de commutation de cellules. Cette forme de commutation est présentée en détail à la section suivante.

Le relais de trames est la première technique de commutation de trames à avoir été définie. Son objectif était de simplifier au maximum la commutation de paquets du protocole X.25 élaborée à la fin des années 70 en plaçant la référence directement dans la trame. Pour augmenter les performances de cette commutation, les reprises sur erreur entre nœuds de commutation ont été supprimées, et les procédures de contrôle de flux et de routage simplifiées. Dans les réseaux Ethernet commutés, on commute la trame Ethernet dans des commutateurs. Comme nous le verrons au chapitre 16, dévolu à Ethernet, deux types de références peuvent être utilisés : l'adresse du destinataire, qui est interprétée comme une référence unique pour aller vers ce destinataire, et une nouvelle génération de référence, dite shim-label, en tout point conforme à la définition du mode commuté.

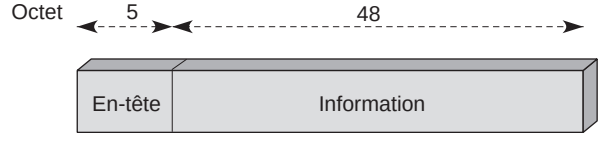
Les techniques de commutation de trames sont regroupées dans ce qu'on appelle le « label-switching », c'est-à-dire la commutation de références. Ces techniques sont à la base du MPLS (MultiProtcol Label-Switching).

Nous avons surtout parlé de commutation dans cette section dédiée au transfert de trames. Il pourrait exister des techniques de routage de trames dans lesquelles la trame porterait l'adresse complète du destinataire. Cependant, il n'existe pas vraiment d'exemple d'une telle technologie. On pourrait songer à une trame de type IP, portant l'adresse IP, c'est-à-dire un paquet IP auquel aurait été ajouté un moyen de détecter le début et la fin, par exemple par le biais d'un drapeau, mais cela reste de la prospective.

La commutation de cellules

La commutation de cellules est une commutation de trames particulière, dans laquelle toutes les trames ont une longueur fixe de 53 octets. Quelle que soit la taille des données à transporter, la cellule occupe toujours 53 octets. Si les données forment un bloc de plus de 53 octets, un découpage est effectué, et la dernière cellule n'est pas complètement remplie. La cellule ATM en est un exemple. Elle est illustrée à la figure 2.9.

Figure 2.9
La cellule ATM



Cette cellule est formée de 53 octets, comprenant 5 octets d'en-tête et 48 octets de données.

La commutation de cellules a pour objectif de remplacer à la fois la commutation de circuits et la commutation de paquets en respectant les principes de ces deux techniques. Pour y parvenir, il suffit de supposer que les temps de transmission et de commutation sont très brefs en comparaison du temps de propagation. Supposons des lignes de communication qui atteignent 1 Gbit/s. Pour émettre les 53 octets de la cellule, il faut un peu moins de 500 ns. Si l'on suppose que la durée de franchissement d'un commutateur est inférieure à 10 µs, on peut considérer que ces valeurs sont négligeables en comparaison du délai de propagation, qui vaut approximativement 1 ms pour 250 km, ou encore 10 ms pour 2 500 km.

En conclusion, la commutation de cellules est une technique de transfert qui a pris un essor considérable à la fin des années 80 grâce à sa simplicité, qui permet de monter facilement en débit.

Les techniques de transfert hybrides

Les différentes techniques de transfert que nous avons examinées dans ce chapitre peuvent se superposer pour former des techniques de transfert hybrides. En règle générale, les superpositions concernent les réseaux utilisant un transfert de paquets de type routage et un transfert de trames de type commutation. Le transfert de trames s'appuie essentiellement sur une commutation (ATM, relais de trames, Ethernet) et le transfert de paquets sur un routage (IP). Cette solution de superposition permet de définir des nœuds de type routeur-commutateur. Lorsqu'on se place au niveau paquet, un routage a lieu ; lorsqu'on se place au niveau trame, c'est une commutation qui est effectuée.

Le choix d'utiliser une commutation de trames ou un routage de paquets dépend généralement de la longueur du message émis. Lorsque le message est court, comme dans une navigation sur le World-Wide Web, il est intéressant de considérer que chaque paquet se débrouille par lui-même. Il faut aller rechercher l'adresse dans le paquet pour pouvoir le router. En revanche, lorsque le message est long, il est intéressant de mettre en place un chemin et des références dans les nœuds pour commuter les trames provenant du découpage du message.

Si l'exemple que nous venons de décrire est le plus fréquent — nous le retrouvons dans les protocoles de type MPLS —, toute autre possibilité peut être imaginée. On peut, par exemple, envisager un routage de trames et une commutation de paquets. Ce cas de figure peut se trouver dans les réseaux qui ont une double adresse, une adresse complète pour le niveau trame et une référence pour le niveau paquet. Lorsqu'une trame arrive dans un nœud, ce dernier récupère l'adresse de niveau trame. Si l'adresse de ce niveau est connue, le routage peut s'effectuer. En revanche, si l'adresse de niveau trame n'est pas connue, il est possible de décapsuler la trame pour récupérer le paquet et examiner la référence de ce niveau, laquelle indiquera la direction à prendre. Il en est ainsi des réseaux locaux Ethernet, qui portent, outre l'adresse de niveau trame, des paquets X.25 munis d'une référence de niveau paquet.

Cette solution de transfert hybride est aujourd'hui très appréciée, et beaucoup d'utilisateurs l'ont choisie, principalement au travers de la technique MPLS.

Conclusion

Les réseaux de transfert de données offrent deux grandes classes de solutions : les transferts de type routage et les transferts de type commutation. On peut trouver des arguments en faveur d'une solution ou de l'autre, la meilleure solution dépendant essentiellement de l'objectif recherché.

Si le but visé est d'obtenir une qualité de service et un certain nombre de propriétés de contrôle de l'environnement, la commutation est plus séduisante. En revanche, si l'on recherche un moyen économique, le routage est moins complexe, et donc beaucoup moins cher.

Les solutions hybrides semblent former un compromis prometteur, malgré leur prix de revient assez élevé puisque deux technologies se superposent.

Références

Une excellente introduction aux techniques de routage et de commutation :

H. C. BERKOWITZ – *Network Architecture and Development Series: Designing Routing and Switching Architectures*, Macmillan, 1999

Les protocoles du monde IP sont très bien introduits dans le livre suivant :

U. BLACK – *Internet Architecture: An Introduction to IP Protocols*, Prentice Hall, 2000

Livre qui s'intéresse aux architectures, en particulier pour le transport des données et de la parole de façon intégrée :

O. C. IBE – *Converged Network Architectures: Delivering Voice and Data Over IP, ATM, and Frame-Relay*, Wiley, 2001

Le cas de l'architecture IP-switching, qui travaille à la fois en routage et en commutation, est bien expliqué dans le livre suivant :

C. METZ – *IP Switching: Protocols and Architectures*, McGraw-Hill, 2000

Excellent livre qui introduit les réseaux destinés aux entreprises et fournit des compléments pratiques indispensables à une implémentation :

J.-L. MONTAGNIER – *Réseaux d'entreprise par la pratique*, Eyrolles, 2004

Livre généraliste pour une introduction globale au monde des télécommunications :

J. G. NELLIST, E. M. GILBERT – *Modern Telecommunications*, Artech House, 1999

Excellent livre de base sur les architectures de réseau :

M. NORRIS, R. DAVIS – *Component-based Network System Engineering*, Artech House, 1999

Pour ceux qui souhaitent mieux comprendre la problématique des hauts débits :

C. SERVIN, S. GHERNAOUTI-HÉLIE – *Les Hauts Débits en télécoms*, InterÉditions, 1998

L'ouvrage suivant présente en détail l'architecture TCP/IP et la nouvelle génération de protocoles de cette architecture :

S. A. STEPHEN – *IPng and the TCP/IP Protocols*, Wiley, 1996

Un excellent livre, très complet, sur les architectures réseau :

R. WILLIAMS – *Computer Systems Architecture*, Addison Wesley, 2001