

## Routeurs et commutateurs

---

Les technologies de transfert de paquets doivent permettre de transférer une trame arrivant dans un nœud vers une ligne de sortie. Les techniques qui permettent ce transfert sont de deux types, le routage et la commutation. Le routage consiste à transporter des trames ou des paquets avec leur adresse de destination, tandis que la commutation utilise des références pour passer d'un port d'entrée à un port de sortie à l'intérieur d'un commutateur.

La différence entre un routeur et un commutateur réside dans ce qui est transporté dans le champ d'adressage : une adresse complète dans le premier cas et une référence dans le second. La gestion des tables de routage est plus complexe que celle des tables de commutation, qui sont généralement plus petites, puisque seules les connexions actives sont prises en compte.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux architectures des routeurs et des commutateurs. En fait, leurs architectures internes sont assez similaires. La différence essentielle entre elles vient de la façon de déterminer le nœud suivant à atteindre, c'est-à-dire la bonne porte de sortie du nœud.

Précisons un point de vocabulaire : nous utilisons dans ce chapitre les mots cellule et trame pour désigner l'entité qui doit être routée ou commutée d'une porte d'entrée vers une porte de sortie. En effet, si le mot cellule est dévolu uniquement aux commutateurs ATM, le mot trame est plus large et s'applique à l'ensemble des routeurs et des commutateurs. Le mot paquet est réservé au bloc de niveau 3. Un paquet peut être routé (IP) ou commuté (X.25). Cependant, comme il n'existe pratiquement plus que le paquet IP, on assimile souvent paquet et routeur.

### Architecture des routeurs

Les routeurs sont des équipements réseau capables de router les blocs d'information qui leur arrivent. Ces blocs d'information sont des paquets si nous sommes au niveau 3 et des trames si nous sommes au niveau 2. En fait, il n'existe pas vraiment de routeurs de niveau 2. La seule technologie dans laquelle nous pourrions parler de routeur de niveau 2 est Ethernet. Si nous considérons l'adresse MAC Ethernet comme étant une adresse complète de niveau 2, un commutateur Ethernet devrait s'appeler un routeur Ethernet.

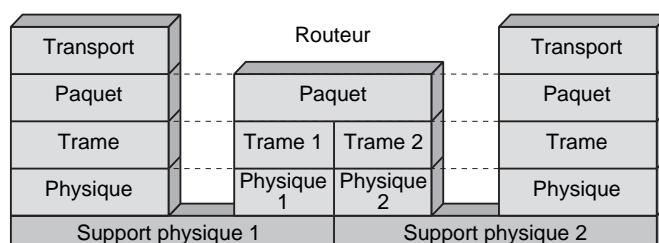
En réalité, l'adresse MAC Ethernet est assimilée à une référence. Tous les nœuds d'un réseau Ethernet commuté doivent commuter sur cette référence, qui est égale à l'adresse MAC du destinataire.

Les routeurs les plus connus sont les routeurs IP puisqu'un paquet IP possède l'adresse complète du destinataire du paquet. On a donc tendance à faire l'amalgame entre routeur et routeur IP. Cela n'est pas exact dans la logique des réseaux, puisqu'un routeur pourrait très bien ne pas être un routeur IP. Par exemple, les routeurs IPX ont été très populaires avant l'arrivée massive d'IP.

L'architecture protocolaire d'un routeur est illustrée à la figure 31.1.

**Figure 31.1**

*Architecture protocolaire d'un routeur*



Les routeurs IP se différencient des commutateurs par le traitement de l'adresse du destinataire. Dans un routeur, le traitement s'exerce sur l'adresse complète et la consultation de la table de routage. Dans un commutateur, le traitement s'effectue sur la référence et utilise la table de commutation.

Dans les premiers routeurs, la recherche du port de sortie s'effectuait par logiciel, ce qui ralentissait énormément les transferts. La vitesse globale du routeur est dans ce cas limitée par la puissance de traitement du protocole et des adresses. Pour un routeur logiciel, des ports atteignant un débit de 10 Mbit/s sont envisageables, mais il est très rare de disposer de ports à 100 Mbit/s, ou alors en très petit nombre. Les routeurs matériels utilisent des ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Ces microprocesseurs et mémoires rapides leur offrent un niveau de performance sans commune mesure avec celui des routeurs logiciels.

Un routeur est composé d'interfaces d'accès et de sortie, d'un ou plusieurs processeurs, de modules de mémoire et d'une unité d'interconnexion. Cette unité d'interconnexion fait très souvent appel à une technologie de commutation que nous détaillons dans la suite du chapitre. Le paquet est d'abord traité par l'interface d'entrée, puis le processeur de traitement de la table de routage choisit l'interface de sortie, le paquet étant mémorisé dans un module mémoire. Ensuite, le paquet est transféré vers l'interface de sortie par l'unité d'interconnexion. La figure 31.2 illustre l'architecture interne d'un routeur.

La détermination du port de sortie incombe au processeur gérant la table, qui doit trouver la meilleure route pour aller vers l'adresse de destination du paquet. Dans un environnement IP, on utilise pour cela des protocoles de routage de type RIP ou OSPF (voir le chapitre 18). Cela suppose une connaissance de la topologie du réseau et éventuellement des défaillances des liaisons et des fortes congestions. Toujours pour le routage des paquets IP, il faut, dans l'ordre, valider le paquet et ses différents champs puis rechercher le port de sortie, qui peut être local, distant ou multicast. Dans ce dernier cas, il faut éventuellement, après traitement, recopier le paquet sur plusieurs ports de sortie. Il convient ensuite de contrôler le temps de vie du paquet (valeur du champ TTL, ou Time To Live).

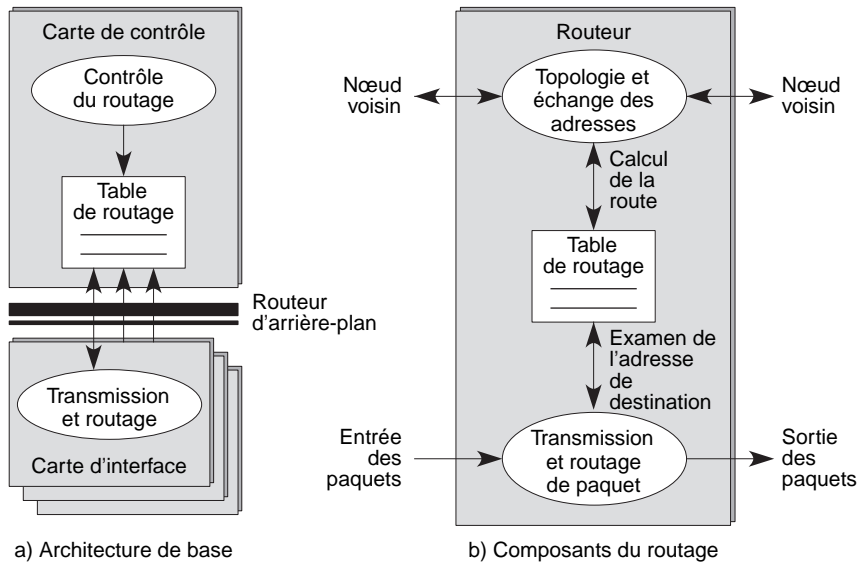


Figure 31.2

*Architecture interne d'un routeur*

Dans IPv4, il faut recalculer la zone de détection d'erreur. Il en va de même dans IPv6. Éventuellement, il faut fragmenter ou réassembler les paquets pour qu'ils soient compatibles avec les paquets ou les trames de la ligne de sortie.

Pour accélérer la vitesse de traitement, il est possible d'utiliser un cache de routage, comme illustré à la figure 31.3.

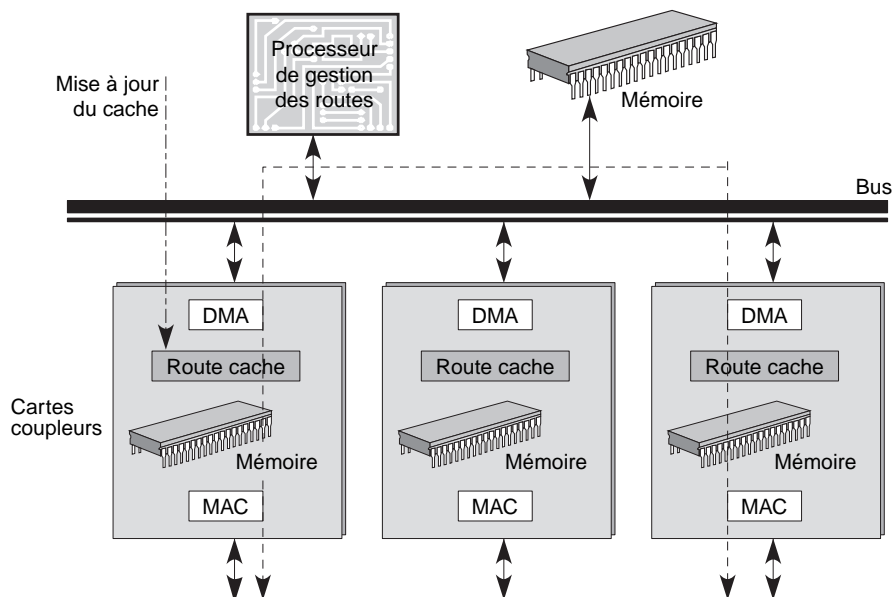


Figure 31.3

*Routeurs avec cache mémoire de traitement de l'adresse*

## Architecture des commutateurs

Les architectures des commutateurs sont assez semblables dans la plupart des technologies de commutation telles que ATM, le relais de trames ou Ethernet ainsi que dans le cœur de commutation des routeurs, c'est-à-dire dans l'élément central du routeur permettant le transfert d'une interface d'entrée vers une interface de sortie une fois le nœud suivant choisi. Lorsque l'architecture du commutateur est de niveau 3, ce sont des paquets qui sont commutés. Lorsque l'architecture est de niveau 2, ce sont des trames. Comme la plupart des commutateurs sont de niveau 2, nous parlerons de commutateur de trames, même s'il s'agit de façon sous-jacente de commutateur de paquets.

De nombreuses catégories d'architecture de commutateurs ont été proposées, et des types très variés de circuits VLSI (Very Large Scale Integration), les fameuses puces de silicium, ont été développés dans les laboratoires de recherche et chez les industriels. Les diverses publications issues de ces travaux distinguent trois types principaux d'architecture : 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 modernes, les commutateurs doivent pouvoir transférer les trames à des débits extrêmement rapides, de l'ordre de cent mille à un million de trames par seconde et par ligne d'entrée. La réalisation de tels commutateurs demande des composants à haute performance.

Les commutateurs doivent être capables de supporter des trafics tant homogènes que sporadiques. Par ailleurs, la qualité de service fournie par le réseau étant affectée par le délai de transfert de bout en bout et la probabilité de perte de trames, une différenciation des services est nécessaire. Les objectifs et critères de performance de cette différenciation peuvent toutefois être opposés, tels que la perte d'aucune trame, mais avec un temps de latence important, ou au contraire la perte de trame, mais avec un temps de traversée réduit. Un service de commutation avec priorité est donc essentiel pour que les différentes classes de services puissent coexister à l'intérieur d'un même commutateur.

### Rôle et fonctionnalités des commutateurs

Un commutateur est un composant avec  $n$  entrées et  $n$  sorties qui achemine les paquets arrivant sur les entrées vers leur destination de sortie.

Le rôle d'un commutateur consiste à assurer les trois fonctions essentielles suivantes :

- analyse de l'en-tête de la trame et sa traduction ;
- commutation spatiale, ou routage ;
- multiplexage des trames sur la sortie requise.

Les données des utilisateurs sont transportées dans le champ de données des trames et transférées de manière asynchrone. Du fait de son comportement statistique et parce qu'un nombre important de flots peuvent partager la même liaison, le commutateur doit se synchroniser sur les instants d'entrée des trames dans le nœud. Le commutateur examine l'en-tête de chaque trame pour identifier la porte de sortie de la trame. Cette identification s'effectue soit par l'intermédiaire de la référence qui détermine le chemin, soit par l'adresse complète du destinataire dans le cas d'un routage. Il convertit la zone de supervision en un nouvel en-tête pour le nœud de commutation suivant, gère le routage et envoie des informations de contrôle et de gestion dans les réseaux associés.

Dans un commutateur ATM, la commutation s'effectue à partir du VCI (Virtual Channel Identifier) ou du VPI (Virtual Path Identifier) contenus dans l'en-tête de la cellule. Des mécanismes de contrôle de collision permettent aux trames provenant de différentes entrées d'accéder à la file d'attente d'un même multiplex, qui n'est autre qu'une voie de communication prenant en charge plusieurs flux simultanément. Les trames sont commutées individuellement, l'horloge interne du commutateur travaillant à un rythme correspondant au temps de transmission d'une trame ATM. Par exemple, si la ligne de communication la plus rapide a un débit de 10 Gbit/s, la durée de la transmission d'une trame ATM est de 42,4 ns. Dans ce cas, le commutateur est rythmé à la cadence d'une décision toutes les 42,4 ns.

La réalisation d'un commutateur peut s'effectuer de diverses façons. Dans tous les cas, il faut créer une fonction de stockage, qui peut se trouver à l'entrée, à la sortie ou le long de la chaîne de commutation. À l'intérieur du commutateur, diverses techniques de routage peuvent être mises en œuvre : circuit virtuel, autoroutage ou datagramme. Deux des principales fonctions assurées par le commutateur correspondent au routage et à la mémorisation des trames. Des fonctions optionnelles, telles que le recouvrement d'erreur ou le contrôle de flux, peuvent être éventuellement implémentées dans les commutateurs.

Un commutateur doit satisfaire à de nombreuses contraintes, notamment les suivantes :

- très haut débit ;
- faible délai de commutation ;
- très faible taux de perte de trames ;
- gestion des applications multicast (communication multipoint) ;
- modularité et extensibilité ;
- faible coût d'implémentation.

De plus, un commutateur moderne doit être pourvu de fonctions de distribution et de gestion des priorités.

## ***Les catégories de commutateurs***

De nombreux auteurs ont tenté de mettre un peu d'ordre dans la prolifération des propositions de structure des commutateurs. Nous adoptons dans ce livre une classification qui recouvre les architectures de la quasi-totalité des commutateurs et repose sur cinq critères d'architecture :

- architecture interne en fonction du nombre d'étapes élémentaires ;
- type de liaison à l'intérieur du commutateur ;
- technique de commutation interne ;
- contrôle interne du commutateur ;
- position des mémoires et blocages internes.

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. Plus le nombre d'étapes est faible, plus le temps de réponse est court.

La liaison à l'intérieur du commutateur peut être dédiée ou statistique. Pour les liaisons dédiées, les trames vont d'une porte d'entrée vers une porte de sortie en transitant toujours par le même chemin. Dans le cas statistique, toute trame est apte à emprunter

une liaison quelconque à l'intérieur du commutateur. Le routage est déterminé par un algorithme de contrôle.

Le tableau 31.1 récapitule ces cinq catégories de commutateurs et leurs propriétés.

Architecture interne	Liaison interne	Commutation interne	Contrôle du commutateur	Mémoire et blocage
Nombre d'étapes à parcourir	Liaison dédiée  Liaison statistique	Répartition dans l'espace  Répartition dans le temps	Algorithme de gestion des ressources ; routage, contrôle de flux	Position des mémoires dans le commutateur  Possibilité de blocage interne

TABLEAU 31.1 • Critères de classification des commutateurs

Les techniques de commutation interne peuvent se classer en deux grandes catégories : par répartition dans l'espace et par répartition dans le temps. Dans le premier cas, plusieurs chemins parallèles peuvent être mis en place pour véhiculer les trames, tandis que dans le second, les trames se partagent les ressources dans le temps. Pour simplifier la présentation, nous supposons qu'avec la répartition dans le temps, toutes les trames transitent par une même liaison interne, liaison nécessairement statistique. Dans la réalité, il peut y avoir superposition des deux techniques de commutation : plusieurs liaisons sont possibles, et, sur ces liaisons, il peut y avoir un multiplexage temporel.

Les algorithmes de gestion des ressources permettent le contrôle du commutateur. Ces algorithmes concernent, entre autres, le routage des trames et les contrôles de flux et de congestion.

## Blocage et mémorisation

À l'intérieur du commutateur, il peut être nécessaire de mémoriser des trames lorsqu'un phénomène de blocage se produit, c'est-à-dire quand deux trames entrent en compétition pour obtenir une même ressource. Il faut alors mettre une trame en attente. Les mémoires peuvent se situer à l'entrée, à la sortie ou en différents points à l'intérieur du commutateur.

### Les différents types de blocages

Comme nous venons de le voir, il existe des commutateurs avec blocage et d'autres sans blocage. On distingue trois types de blocages, le blocage interne, le blocage en sortie et le blocage en tête de file :

- **Blocage interne.** Ce blocage survient lorsque plusieurs trames veulent accéder à la même liaison interne. Des conditions de non-blocage ont été spécifiées pour un réseau Banyan (*voir plus loin dans ce chapitre*). Un réseau Banyan est non bloquant si les entrées actives  $x_1, x_2, \dots, x_k$  et leurs sorties respectives  $y_1, y_2, \dots, y_k$  satisfont les relations suivantes :
  - Les sorties sont monotones, c'est-à-dire que  $y_1 < y_2 < \dots < y_k$  ou  $y_1 > y_2 > \dots > y_k$ .
  - Les entrées sont concentrées, c'est-à-dire que toute entrée comprise entre deux entrées actives est active.
- **Blocage en sortie.** Comme il n'y a pas de coordination entre les trames qui arrivent en fonction de leur destination, les trames qui parviennent dans la même tranche de temps peuvent être destinées à une même sortie et donc aboutir à un conflit en sortie.

- **Blocage en tête de file, ou HOL (Head Of Line).** Ce blocage intervient dans les files d'entrée du commutateur. Considérons deux files d'entrée avec des trames en tête de file entrant en conflit pour une même sortie. Une de ces trames est acceptée pour le routage interne vers la sortie, tandis que les autres sont bloquées. Cette technique impose la contrainte suivante : les trames situées dans la file d'attente derrière les trames bloquées ne peuvent être transmises vers leur sortie, même si elles sont destinées à des sorties non conflictuelles.

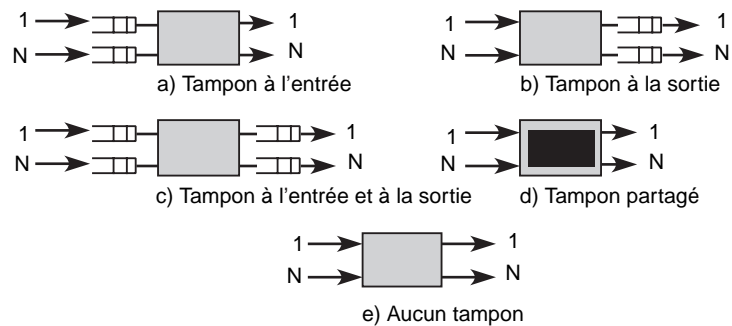
### Placement des mémoires

Le placement des mémoires tampons, ou buffers, pour stocker les trames et les moyens permettant de résoudre les contentions en sortie affecte à la fois les performances et la complexité des commutateurs.

La figure 31.4 illustre les différents placements de mémoires envisageables.

**Figure 31.4**

*Placement des mémoires tampons dans les commutateurs*



Les architectures avec mémoire tampon à l'entrée permettent à toute nouvelle arrivée d'être placée dans les mémoires tampons situées au port d'entrée, résolvant de ce fait les problèmes de contention. Les trames en tête de chaque file essaient d'accéder aux liaisons de sortie. Les trames sélectionnées sont délivrées aux ports de sortie, tandis que les autres restent en tête de file pour un nouveau tour d'arbitrage. Le problème majeur de cette architecture est le blocage en position de tête, qui limite le débit.

Les architectures utilisant une file partagée ne rencontrent pas ce type de blocage. Les trames qui se présentent en entrée sont directement soumises au commutateur, et la résolution de contention pour le port de sortie a lieu avant le transport de la trame. Les trames bloquées restent dans le commutateur et sont recyclées vers leur port, où elles sont resynchronisées avec l'ensemble des nouvelles arrivées.

Concernant le taux de perte de trames, les commutateurs à mémoire partagée présentent les meilleures performances. En effet, chaque adresse de la mémoire partagée peut être allouée temporairement à n'importe quel port de sortie, et non à un port de sortie particulier. De la sorte, la limite maximale de longueur de chaque file, et notamment des files de sortie, peut être étendue jusqu'au débordement de la mémoire partagée, le taux de perte des trames s'en trouvant réduit.

Les architectures avec mémoires tampons en sortie utilisent des chemins parallèles pour accéder aux ports de sortie. Cela autorise la délivrance de multiples trames simultanément pour chaque destination. Les mémoires tampons situées à chaque port de sortie stockent les trames en attendant l'accès aux liaisons de transmission.

## Exemples de commutateurs

Les sections qui suivent présentent les commutateurs les plus connus en fonction des critères que nous avons introduits à la section précédente.

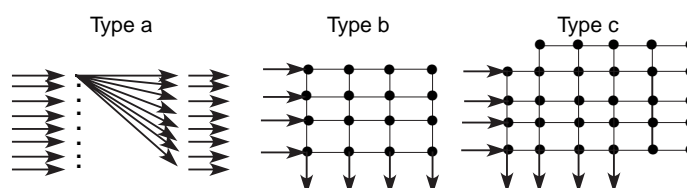
### Le commutateur Crossbar

L'un des commutateurs les plus simples se construit en reprenant les concepts des premiers autocommutateurs Crossbar téléphoniques, qui remontent à plusieurs dizaines d'années. Les commutateurs Crossbar électroniques, et non plus mécaniques, font toujours partie, au début des années 2000, des petits commutateurs les plus vendus.

La figure 31.5 illustre le fonctionnement de trois types de commutateurs Crossbar.

Figure 31.5

Commutateurs Crossbar



Ces commutateurs Crossbar comportent des flots qui entrent par les flèches de gauche et sortent par les flèches de droite pour le type a et par les flèches du bas pour les types b et c. Le rôle de ces commutateurs est d'acheminer des flots de trames arrivant sur l'une des entrées vers une des sorties. Dans les types b et c, les points noirs indiquent des commutateurs élémentaires permettant à une trame de se diriger vers trois sorties au choix, une sortie vers le haut, une sortie tout droit et une sortie vers le bas. Bien sûr, lorsqu'on arrive aux bords du commutateur, il ne peut y avoir que deux sorties au choix, voire une seule pour le commutateur élémentaire situé en haut à droite.

Le commutateur Crossbar illustré à la partie gauche de la figure (type a) permet, à partir de toute entrée, d'aller directement à toute sortie. De mécaniques au début du siècle, les relais sont devenus électroniques à partir des années 1980. Le commutateur Crossbar de base de type a ne comporte qu'une étape : une trame entrant dans le Crossbar va directement à la ligne de sortie. La liaison est dédiée entre la porte d'entrée et la porte de sortie, la commutation est répartie dans l'espace, et le routage est fixe. Si deux trames se dirigent en parallèle vers une même porte de sortie, des mémoires sont nécessaires soit à la porte d'entrée, soit à la porte de sortie. De ce fait, il n'y a pas de blocage interne au commutateur.

Il existe des commutateurs Crossbar beaucoup plus complexes, dont l'architecture est profondément modifiée. Par exemple, la partie centrale de la figure 31.5 (type b) décrit un commutateur qui permet de mettre en place une ou plusieurs voies entre l'entrée et la sortie. Dans ce cas, il faut  $n^2$  points de connexion pour  $n$  entrées et  $n$  sorties du commutateur. Un seul chemin peut être envisagé entre une entrée et une sortie. Plusieurs chemins distincts sont disponibles grâce aux commutateurs élémentaires permettant de diriger la trame vers trois directions distinctes (ou deux ou une sur les bords du commutateur). Ces commutateurs n'empêchent pas les collisions potentielles entre les trames sur les chemins internes. Il faut donc stocker les trames dans des mémoires en entrée et mettre



en place un mécanisme écoulant un maximum de trames en parallèle. Une autre possibilité consiste à placer des mémoires à chaque point de jonction, ce qui augmente d'autant le nombre d'étapes à franchir en interne.

En se servant des cinq critères que nous avons introduits à la première section de ce chapitre, un commutateur Crossbar avec mémoires se définit par un nombre d'étapes dépendant de la route et des portes d'entrée et de sortie, des liaisons statistiques, une commutation dans l'espace, un routage dynamique et des mémoires intermédiaires nécessaires pour éviter les blocages internes.

On peut modifier le commutateur en agrandissant le nombre de commutateurs élémentaires pour permettre un plus grand nombre de parcours et éviter les collisions. À chaque collision potentielle, la trame est détournée de son chemin direct et doit, soit tourner à gauche, soit aller tout droit. En faisant tourner la trame trois fois à gauche, on finit par retrouver le chemin de départ. On peut se représenter le commutateur comme modélisant les rues de Manhattan, à New York, et la trame comme étant une voiture. Dans Manhattan, pour simplifier la circulation, il est interdit de tourner sur sa gauche, de façon à ne pas couper les flux de circulation. Pour prendre une direction à gauche dans un carrefour, il faut aller tout droit et tourner trois fois à droite. Les commutateurs que nous examinons s'appellent des commutateurs Manhattan pour rappeler cette analogie et la possibilité pour une trame de prendre des chemins détournés pour arriver à la sortie choisie. Un commutateur Manhattan est illustré à la partie droite de la figure 31.5 (type c).

Les caractéristiques comparées des trois architectures Crossbar sont indiquées au tableau 31.2.

	Architecture interne	Liaison interne	Commuation interne	Contrôle du commutateur	Mémoire et blocage
<b>Crossbar (fig 26.5.a)</b>	1 étape	Liaison dédiée	Répartition dans l'espace	Routage fixe	Pas de blocage interne
<b>Crossbar (fig 26.5.b)</b>	<i>n</i> étapes	Liaisons statistiques	Répartition dans l'espace	Routage dynamique	Blocage interne résolu par des mémoires
<b>Crossbar (fig 26.5.c)</b>	<i>n</i> étapes	Liaisons statistiques	Répartition dans l'espace	Routage spécifique	Blocage interne résolu par le routage

TABLEAU 31.2 • Caractéristiques des commutateurs Crossbar

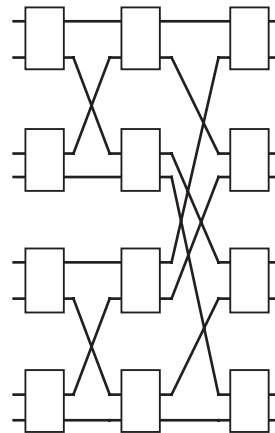
Le commutateur *Banyan* et ses extensions

Le commutateur de base qui semble rassembler le plus de suffrages est le commutateur Banyan, illustré à la figure 31.6. Ce commutateur 8x8 possède huit files d'entrée et huit files de sortie. Les trames à commuter se présentent sur la gauche et doivent ressortir sur l'une des huit files de sortie indiquées sur la droite de la figure. Ce commutateur est construit avec douze commutateurs élémentaires, un commutateur élémentaire étant ici un commutateur possédant deux entrées et deux sorties, ce que l'on appelle encore un commutateur 2x2. Ce commutateur comporte trois étages, un étage étant représenté par la traversée d'un commutateur élémentaire 2x2. En d'autres termes, la trame qui se

présente sur l'une des huit entrées doit traverser trois commutateurs élémentaires pour atteindre une sortie.

**Figure 31.6**

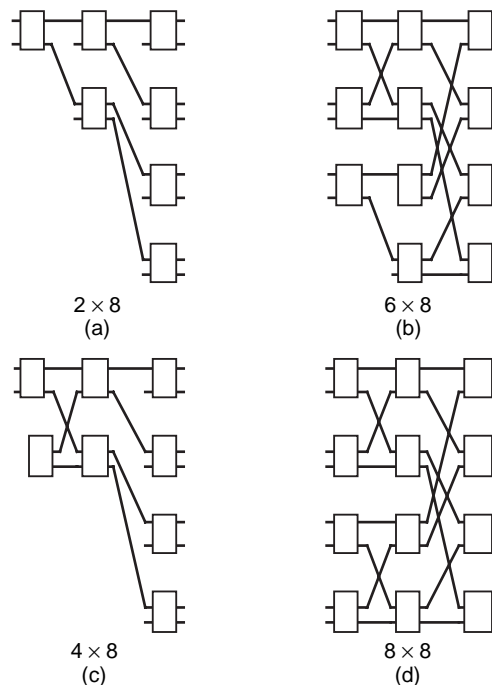
*Commutateur Banyan*



La figure 31.7 illustre la construction d'un commutateur Banyan. À partir des deux premières entrées, celles du haut à gauche, on accède aux huit sorties en utilisant des commutateurs élémentaires à deux entrées et deux sorties. On obtient dans l'étape a de la figure 31.7 un commutateur 2x8, qui possède deux entrées et huit sorties. À l'étape b, on ajoute deux nouvelles entrées et un commutateur élémentaire, qui prend en charge ces deux nouvelles entrées. On relie ce commutateur élémentaire aux entrées libres des commutateurs élémentaires du deuxième étage de l'étape a, ce qui permet de construire un commutateur 4x8. L'étape c permet de passer à un commutateur 6x8 et l'étape d à un commutateur Banyan 8x8 complet.

**Figure 31.7**

*Étapes de construction d'un commutateur Banyan*



Avec un étage de commutateurs élémentaires, on accède à 2 sorties depuis 2 entrées. Avec deux étages, on accède à 4 sorties depuis 4 entrées, et, plus généralement, avec  $n$  étages, on accède à  $2^n$  sorties depuis  $2^n$  entrées, ce qui constitue un avantage par rapport au Crossbar, le nombre de commutateurs élémentaires utilisés pour réaliser le commutateur global étant beaucoup plus petit.

Deux types de collisions entre trames peuvent se produire :

- Deux trames qui convergent vers la même sortie.
- Deux trames qui empruntent la même voie à l'intérieur d'un commutateur élémentaire.

Comme à chaque couple entrée-sortie ne correspond qu'un seul chemin, il n'est pas possible d'éviter la collision en changeant de chemin. De nouveau, pour éviter ces deux types de collisions, on peut ajouter des mémoires à l'entrée, à la sortie ou dans tous les commutateurs élémentaires intermédiaires.

### Les commutateurs actuels

Au moins trois possibilités sont utilisées pour les commutateurs d'aujourd'hui :

- plusieurs commutateurs Banyan en série ;
- commutateur Batcher Banyan ;
- commutateur Knock-out.

### Commutateurs Banyan en série

Pour deux commutateurs en série, il y a  $m$  façons d'aller de l'émetteur au récepteur, si  $m$  est le nombre d'entrées et de sorties. Si  $k$  commutateurs sont en série,  $m^{k-1}$  chemins peuvent être envisagés. Néanmoins, cela ne résout pas directement les problèmes de collisions en sortie et rallonge le délai de transit.

### Commutateur Batcher Banyan

Dans un commutateur Batcher Banyan, les trames qui entrent en collision en sortie sont recyclées suivant le principe illustré à la figure 31.8. Le premier commutateur Banyan (trieur) permet de changer de ligne, et le deuxième (sélectionneur) d'opérer une sélection parmi les trames qui ont la même direction et qui entreraient en collision sur la ligne de sortie. Ensuite, le concentrateur permet de diriger la trame soit vers le dernier commutateur Banyan, et donc d'atteindre la ligne de sortie, soit de l'envoyer vers l'une des entrées d'un commutateur de recyclage de type  $M \times M$  permettant de réintroduire la trame en début de cycle. Le choix de recycler une trame est pris dès que la ligne de sortie sur laquelle doit se rendre la trame est saturée. Une trame peut donc tourner dans le commutateur tant que la ligne de sortie est saturée.

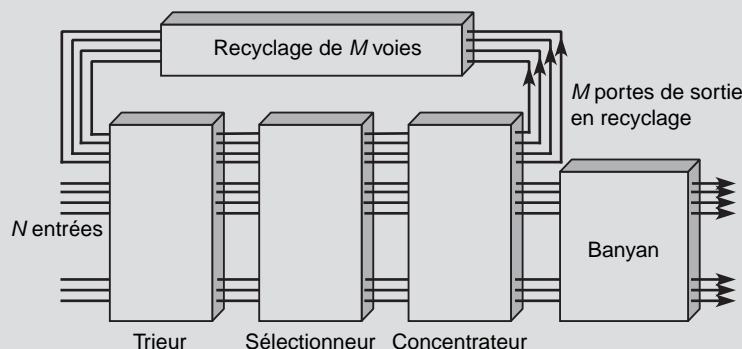


Figure 31.8

Fonctionnement du commutateur Batcher Banyan

### Commutateur Knock-out

Dans le commutateur Knock-out illustré à la figure 31.9, à partir d'une ligne d'entrée, les trames sont diffusées vers l'ensemble des interfaces de sortie. Dans l'interface de sortie, un Banyan à  $n$  entrées permet de faire converger les trames qui se dirigent vers la sortie  $n$ . Si plusieurs trames se présentent sur le même commutateur élémentaire, l'une d'elles est mise en attente de telle sorte qu'une seule trame sorte vers  $n$ . Le commutateur interne à l'interface de sortie est illustré à la figure 31.10.

Figure 31.9

Fonctionnement du commutateur Knock-out

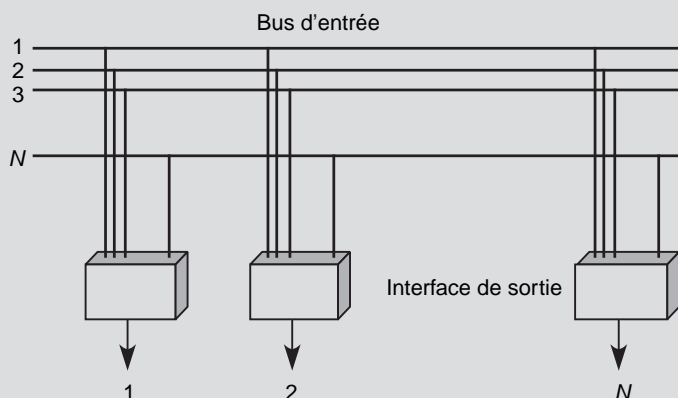
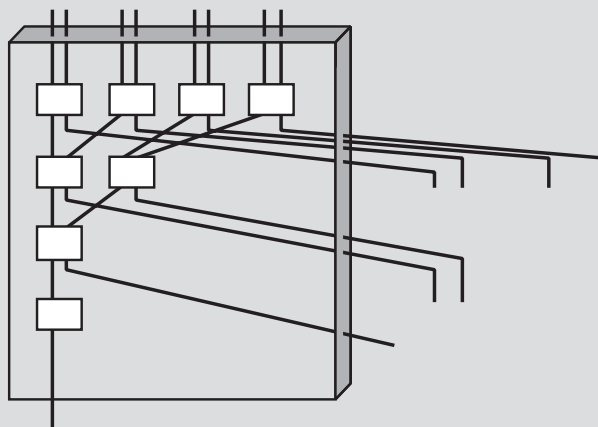


Figure 31.10

Commutateur d'interface d'un Knock-out



### Autres commutateurs

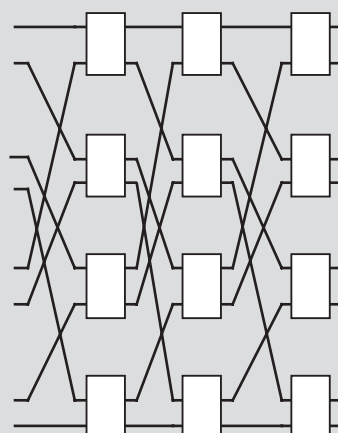
Pour compléter la description des commutateurs actuels, on peut noter que, dans un réseau Banyan, si huit trames arrivent aux huit entrées simultanément, il n'y a qu'une seule possibilité de sortie pour que le parallélisme soit complet. Dans le réseau Banyan, cette possibilité est la suivante :

1 1 ; 2 5 ; 3 3 ; 4 7 ; 5 2 ; 6 6 ; 7 4 ; 8 8.

On peut imaginer d'autres commutateurs, avec des parallélismes différents (commutateurs  $\Delta$ ,  $\Omega$ , etc.), dans lesquels les chemins suivis par les huit trames arrivant sur les huit entrées sont différents de ceux qui existent dans le commutateur Banyan. Le commutateur  $\Omega$  permet l'identité, c'est-à-dire que la trame qui se présente sur l'entrée numéro 1 sort par la sortie numéro 1, la trame qui arrive en même temps sur l'entrée numéro 2 sort par la sortie numéro 2, et ainsi de suite. Le commutateur  $\Omega$  est illustré à la figure 31.11. En prenant, par exemple, la troisième entrée à partir du haut et en suivant toujours tout droit dans les commutateurs élémentaires, on se retrouve sur la troisième ligne de sortie. À la  $i$ ème ligne d'entrée correspond la  $i$ ème ligne de sortie.

**Figure 31.11**

Fonctionnement  
d'un commutateur  $\Omega$



Ce commutateur  $\Omega$  présente toutefois l'inconvénient de ne plus permettre un routage aussi simple que le Banyan, où l'adresse de sortie autorise, lorsqu'elle est codée en binaire, le routage de la trame : avec un 0, on va vers le haut, et avec un 1 on va vers le bas. L'adresse de sortie 010 est atteinte si la trame est routée vers le haut puis vers le bas puis vers le haut pour terminer, et ce quelle que soit l'entrée. L'avantage global de ce système est de permettre le parallélisme des flux de trames à travers le commutateur.

Aujourd'hui, un regain d'intérêt se fait jour pour les techniques de commutation utilisant un bus partagé, car les progrès technologiques permettent de concevoir des bus atteignant des capacités de transport de plusieurs centaines de gigabits par seconde.

Le tableau 31.3 recense les caractéristiques des différents commutateurs provenant de la source Banyan en fonction des cinq critères que nous avons retenus pour la définition d'un commutateur au début de ce chapitre.

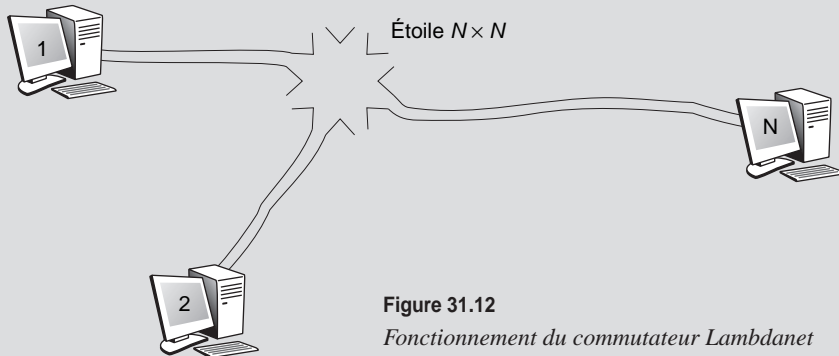
	Architecture interne	Liaison interne	Commutation interne	Contrôle du commutateur	Mémoire et blocage
Banyan élémentaire	1 étape	Liaisons dédiées	Répartition dans l'espace	Autoroutage	Pas de blocage interne
Banyan avec mémoire	$m$ étapes	Liaisons dédiées	Répartition dans l'espace	Autoroutage dynamique	Pas de blocage résolu par des mémoires
Batcher Banyan	1 étape ( $n$ étapes si $n$ rebouclages)	Liaisons statistiques	Répartition dans l'espace	Routage spécifique	Blocage interne résolu par le routage
Knock-out	1 étape	Liaisons dédiées	Répartition dans l'espace	Autoroutage	Blocage interne résolu par des mémoires internes

**TABLEAU 31.3 •** Caractéristiques des commutateurs de type Banyan

D'autres types de commutateurs de trames sont incarnés par le Lambdanet et le Shuffle-Net. Ces deux commutateurs utilisent de la fibre optique avec du multiplexage en longueur d'onde, plusieurs faisceaux lumineux étant véhiculés en parallèle dans le cœur de la fibre optique.

### Le Lambdanet

La figure 31.12 illustre le fonctionnement d'un commutateur Lambdanet. À partir d'un émetteur, on envoie sur un sous-canal des trames diffusées par une étoile passive centrale vers des sous-canaux correspondant aux nœuds connectés. Pour 16 nœuds au total, il y a une voie aller et 16 voies de retour entre un nœud et l'étoile optique. Toutes ces voies sont multiplexées en longueur d'onde dans une fibre optique monomode. Chaque voie atteint un débit de 10 Gbit/s si nécessaire. Cette technique facilite la diffusion et le multipoint, mais elle est coûteuse. En particulier, les machines terminales doivent avoir 16 récepteurs distincts pour recevoir sur les 16 longueurs d'onde en même temps.



Le commutateur Lambdanet se caractérise par une étape, une liaison dédiée, une commutation spatiale, pas de contrôle *a priori*, des mémoires en sortie et pas de blocage.

### Le ShuffleNet

Le commutateur ShuffleNet essaie de concilier les méthodes précédentes par des nœuds intermédiaires de commutation. Pour aller d'un point à un autre point, il faut généralement passer par un ou plusieurs nœuds intermédiaires, comme illustré à la figure 31.13. L'avantage de cette technique est d'avoir plusieurs chemins utiles en cas de panne. Ces chemins ont une longueur variable. S'il y a trop d'embouteillage, on peut toujours prendre un autre chemin, certes plus long, pour atteindre le destinataire. Le support est une fibre qui prend en charge 16 canaux multiplexés en longueur d'onde. Sur la figure, pour aller d'un nœud quelconque à un autre nœud, il faut passer au maximum par 3 nœuds intermédiaires. Par exemple, pour aller du nœud 1 au nœud 3, le nœud 1 émet sa trame vers la sortie 2 ; celle-ci arrive au nœud 6, qui l'envoie vers la sortie 11, ce qui permet au nœud 3 de recevoir l'information. L'avantage de cette technique est de n'avoir à chaque nœud que deux émetteurs et deux récepteurs et de disposer de plusieurs chemins pour aller d'un nœud à un autre.

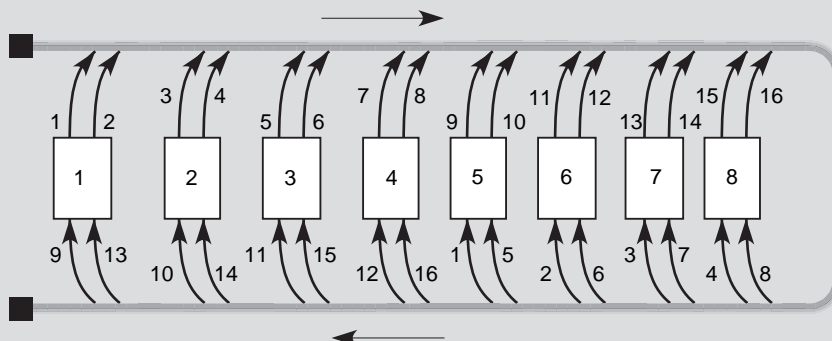


Figure 31.13

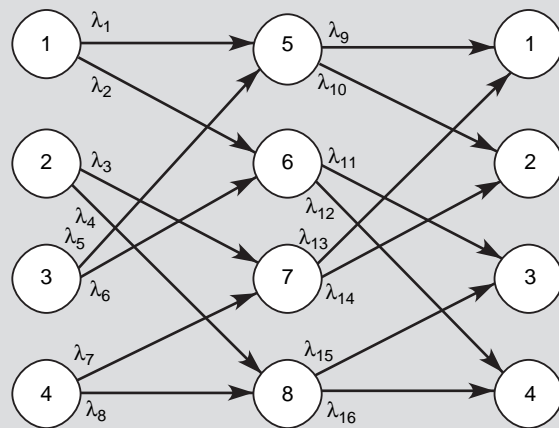
Structure physique du ShuffleNet

Le commutateur ShuffleNet se caractérise par plusieurs étapes, une liaison statistique, une commutation spatiale, un contrôle à l'entrée pour optimiser le chemin et des mémoires dans les nœuds intermédiaires pour éviter les blocages.

Un commutateur ShuffleNet peut aussi être réalisé par le maillage illustré à la figure 31.14. Une trame entrant par le nœud 1 et sortant par le nœud 3 doit être émise par le nœud 1 sur la longueur d'onde 2 ( $\lambda_2$ ) jusqu'à la porte 6, qui retransmet la trame sur la longueur d'onde 11 ( $\lambda_{11}$ ) jusqu'à la porte 3. Nous pouvons vérifier sur la figure que, partant du nœud 1, la trame arrive bien au nœud 3 après avoir suivi le chemin que nous venons d'indiquer. Il est bien sûr possible de trouver d'autres chemins pour aller du nœud 1 au nœud 3. Par exemple, en partant du nœud 1 sur la longueur d'onde 1, la trame arrive sur le nœud 5, qui envoie la trame sur la longueur d'onde 10, ce qui lui permet d'arriver au nœud 2. À partir de ce nœud, en se replaçant à droite de la figure, nous pouvons envoyer la trame sur la longueur d'onde 4, ce qui lui permet d'arriver au nœud 8, et, enfin, en utilisant la longueur d'onde 15, l'envoyer au nœud 3. Le chemin suivi comporte quatre étapes au lieu de deux dans le choix précédent. Ce deuxième choix n'est cependant pas inutile si le nœud 6 tombe en panne.

**Figure 31.14**

*Structure logique du ShuffleNet*



Les techniques que nous venons de décrire sont à la base d'un grand nombre d'architectures de commutateurs actuellement commercialisées. Elles sont fondées sur une répartition dans l'espace. Une génération de commutateurs totalement différente, fondée sur la répartition dans le temps, est analysée à la section suivante.

## Les commutateurs à répartition dans le temps

Les architectures à base de Crossbar ou de Banyan utilisent une répartition dans l'espace, qui privilégie l'affectation de voies parallèles pour effectuer le transport des trames entre les portes d'entrée et de sortie. Une autre grande solution consiste à travailler avec une répartition dans le temps, ce que l'on appelle encore répartition statistique, puisque la répartition des trames dans les tranches de temps se fait de façon statistique. C'est la raison pour laquelle on appelle ces commutateurs à répartition dans le temps des commutateurs temporels statistiques.

Dans ces commutateurs, le support physique est commun à l'ensemble des chemins, un découpage dans le temps permettant d'affecter les communications à tour de rôle. Bien évidemment, des solutions mixtes se sont développées, dans lesquelles un commutateur à répartition dans l'espace commence par proposer de multiples chemins entre une entrée et une sortie. Sur chaque chemin, un multiplexage temporel statistique permet ensuite à plusieurs communications de passer simultanément.

L'inconvénient majeur des techniques de répartition dans le temps est l'obligation d'utiliser un bus commun d'une capacité de transport égale à la somme des vitesses des voies d'accès, ce qui représente un coût important. Les commutateurs ATM temporels statistiques commercialisés par de grands équipementiers incarnent toutefois des solutions acceptables du point de vue du coût.

### Les commutateurs ATM temporels statistiques

Comme expliqué précédemment, les commutateurs temporels statistiques doivent posséder un bus par lequel transitent toutes les trames. Cette contrainte est très forte : pour 64 entrées avec une interface  $T_B$  à 155,52 Mbit/s, qui est l'interface de base normalisée pour les réseaux large bande, le débit du bus doit être de 10 Gbit/s. Le commutateur ATM que nous décrivons ci-après utilise un bus de très grande largeur, d'exactement 424 fils pour les données, une valeur qui correspond à la taille d'une cellule (424 bits). Si le débit de chaque fil est de 100 Mbit/s, on obtient une capacité de transport de 42,4 Gbit/s pour le commutateur. Les deux architectures que nous décrivons reposent, pour la première, sur un support en boucle et, pour la seconde, sur un support en bus.

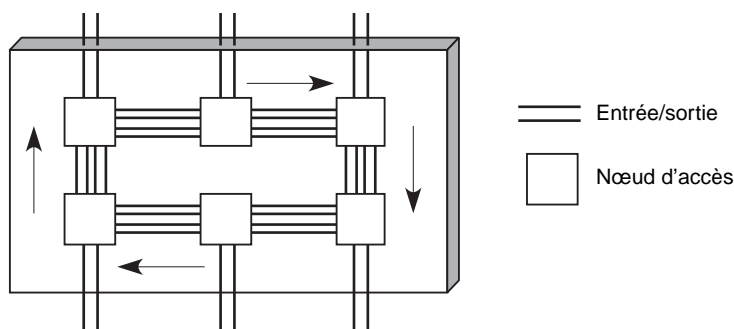
### L'architecture en boucle

La boucle possède 424 lignes, ce qui permet de transporter les cellules en parallèle. Deux lignes supplémentaires sont réservées à la synchronisation et à la supervision. La vitesse de chaque ligne détermine une unité de temps. Si nous supposons une vitesse de 100 Mbit/s, l'unité de temps qui représente la durée d'une transmission est  $y = 10$  ns. Pour entrer sur la boucle, un arbitrage est nécessaire. Nous proposons ici d'utiliser une insertion en parallèle, qui peut être considérée comme un arbitrage distribué. Cette solution est implémentée dans de nombreux commutateurs temporels statistiques sous des formes parfois légèrement différentes.

La cellule est introduite et retirée du support par l'émetteur. Cette solution permet de prendre en charge le multipoint ou la diffusion d'une cellule, les nœuds intermédiaires n'ayant qu'à réaliser une copie de la cellule lors de son passage.

Figure 31.15

Support physique du commutateur ATM temporel statistique



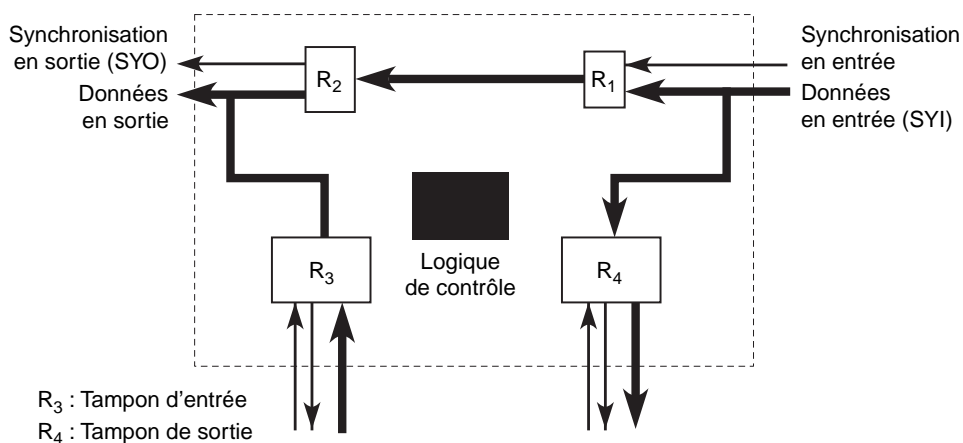
Le support physique illustré à la figure 31.15 est constitué de 6 portes d'entrée-sortie, qui donnent naissance à 6 nœuds internes sur la boucle. Entre ces nœuds, une boucle comportant 424 fils est constituée pour transporter les cellules en parallèle. Dans un nœud, un processus de sérialisation-parallélisation a lieu pour transmettre la cellule en série sur la porte d'entrée-sortie et en parallèle sur le bus interne. Cette partie du commutateur est décrite plus en détail dans l'encadré « L'architecture en bus ».



Nous nous intéressons ici au transport de la cellule d'une porte d'entrée à une porte de sortie, en supposant que la parallélisation a été effectuée.

La cellule est transmise en parallèle, la synchronisation s'effectuant par un signal spécifique sur le fil supplémentaire. Comme la distance est particulièrement petite entre les nœuds d'accès au support, qui se trouvent tous soit sur la même carte physique, soit sur le même circuit imprimé, la synchronisation ne pose aucun problème. Le temps de transmission de la cellule sur le support physique est très court, puisque la transmission s'effectue en parallèle. De plus, dans chaque nœud du support physique, le signal n'a que deux registres à traverser.

L'accès au support physique est détaillé à la figure 31.16. Il utilise deux registres parallèles dont les temps de remplacement sont variables et s'adaptent aux contraintes. Ces deux registres garantissent l'absence de collision sur le support.



**Figure 31.16**

*Architecture du nœud d'accès au support physique*

Soit  $T_e = 10$  ns le temps de remplacement maximal du registre correspondant au temps de transmission d'une cellule. Ce temps de remplacement pouvant en fait être variable, nous supposons ici que les valeurs 2, 4... à 10 ns sont possibles. Ce temps de remplacement dépend de l'activité du nœud, comme nous le verrons plus loin.

Le signal SYO (SYnchronization Out) est transformé en signal SYI (SYnchronization In) sur le fil de synchronisation. Ce signal permet de lire le contenu du registre d'entrée. Il faut noter qu'il n'y a pas d'horloge synchronisée entre les nœuds du support physique.

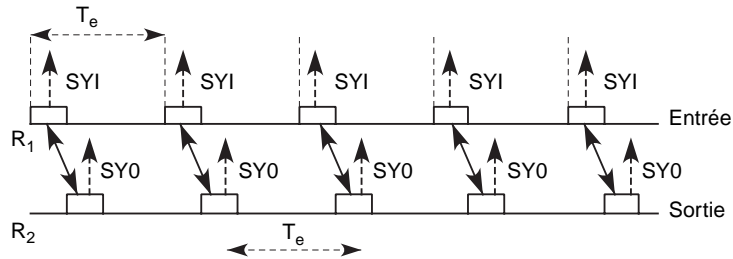
### **Le transit d'une cellule**

Différents cas de figure peuvent se produire dans le nœud d'accès. Une cellule peut transiter dans un nœud sans que celui-ci soit concerné par l'émission ou la réception. Ce passage est illustré à la figure 31.17. La cellule est stockée dans chaque registre pendant un temps minimal, soit 10 ns dans notre exemple, si le nœud n'est pas dans un état

d'insertion. Si le temps de remplacement des registres est supérieur à cette valeur, il faut réduire le plus possible le temps pendant lequel la cellule reste dans les deux registres.

**Figure 31.17**

*Transit dans un nœud*

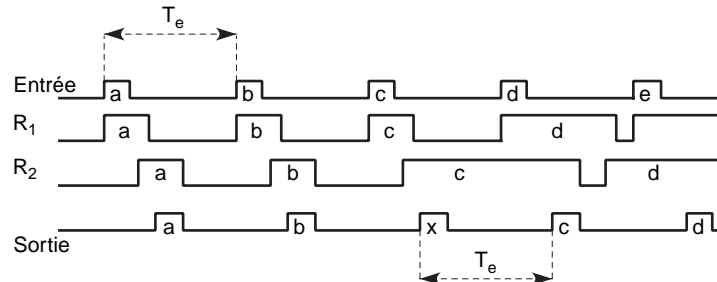


### Insertion d'une cellule

Lorsque le registre  $R_3$  d'émission est plein, la cellule contenue au sommet est insérée sur la boucle juste après la transmission. Si une cellule arrive de la boucle, elle est retardée dans le registre  $R_1$  car la plus petite valeur possible du temps de remplacement est utilisée, mais sans qu'il y ait collision avec la cellule qui vient d'être insérée. Comme illustré à la figure 31.18, la cellule  $x$  est insérée, ce qui retarde la cellule  $c$ , qui doit rester un temps de 50 ns dans les registres  $R_1$  et  $R_2$  avant d'être émise.

**Figure 31.18**

*Insertion d'une cellule*

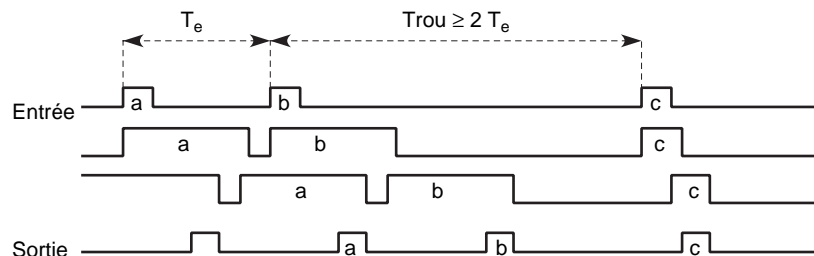


Une fois qu'une cellule est émise, il n'est pas possible d'en transmettre une nouvelle tant que les registres  $R_1$  et  $R_2$  ne retrouvent pas leur état (illustré à la figure 31.18). Pour atteindre cette position, deux possibilités se présentent :

- Attendre un trou suffisamment grand entre deux cellules qui se présentent dans le nœud. Ce cas est illustré à la figure 31.19.
- Attendre qu'une cellule insérée par ce même nœud revienne après un tour de boucle. Lors de son prélèvement du support, le nœud revient à son état de base.

**Figure 31.19**

*Retour en position de base*



Grâce aux registres dont les temps de remplacement sont variables, il est possible de récupérer facilement des trous, qui, sinon, resteraient inemployés. Cette récupération est illustrée à la figure 31.20.

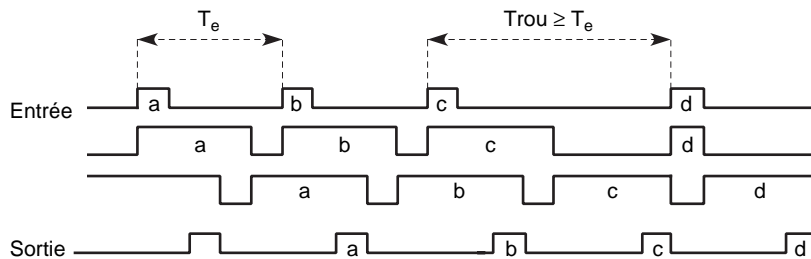


Figure 31.20

Récupération d'un trou sur le support

Les performances de ce commutateur à répartition dans le temps sont bien adaptées aux contraintes des flux ATM grâce à une très grande flexibilité de l'arbitrage distribué du support physique. Tout d'abord, chaque porte du commutateur possède un débit minimal garanti, que nous appelons débit synchrone. Au minimum, une cellule peut être émise durant tous les intervalles de temps égaux au délai de propagation sur la boucle. Dans notre exemple, le temps maximal pour traverser un nœud est de 100 ns. En supposant le délai de propagation négligeable et 64 portes d'entrée-sortie, le temps de propagation maximal sur la boucle est de 6,4  $\mu$ s. On en déduit que toutes les 6,4  $\mu$ s, 48 octets d'informations peuvent être pris en charge, ce qui donne un débit minimal de 60 Mbit/s par porte. Le total des débits minimaux est de 3,84 Gbit/s. Cela représente exactement la moitié de la capacité utile du support. Les autres 3,84 Gbit/s peuvent être distribués de façon asynchrone aux différentes portes du commutateur.

Au moins deux possibilités de gestion de la bande asynchrone peuvent être définies :

- Outre son accès synchrone, une porte peut émettre dans les trous du support. Une fois qu'une cellule a pu être émise sur le support, la porte peut conserver le débit supplémentaire qui lui est donné par cette cellule. Il faut dans ce cas qu'à chaque retard de la cellule supplémentaire une nouvelle cellule soit émise immédiatement pour ne pas perdre le trou qui a été conquis.
- Interdire au nœud qui a conquis un trou supplémentaire de le réutiliser immédiatement.

Dans le premier cas, la porte possède un débit complètement garanti et synchrone, tandis que, dans le second, la bande supplémentaire est équitablement répartie entre les nœuds actifs.

D'après les simulations effectuées pour comprendre le comportement d'un tel commutateur ATM, la seconde solution est satisfaisante et s'adapte bien au trafic par à-coups que l'on rencontre dans les réseaux ATM. Nous avons également noté que les bandes passantes synchrones non utilisées sont récupérées par les autres portes en cas de nécessité. Cela se comprend très bien eu égard au temps de transit sur la boucle. Si nous supposons que 32 stations sur 64 sont inactives, le temps de transit d'une cellule sur la boucle est de 3,84  $\mu$ s — les temps de passage sont de 20 ns dans les stations inactives. Le débit synchrone des stations actives devient donc de 100 Mbit/s.

### L'architecture en bus

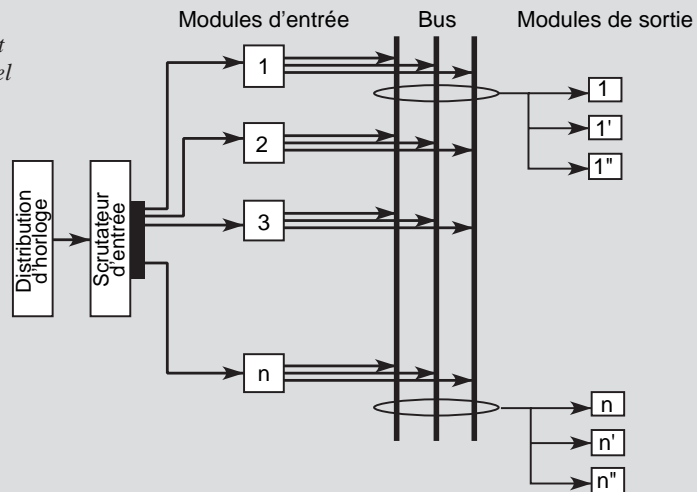
L'idée de cette architecture est de remplacer le support physique en boucle par une architecture en bus. La topologie en bus présente l'avantage de ne pas se préoccuper du prélèvement des informations qui transitent sur le support physique.

Dans ce nouveau commutateur, un scrutateur d'entrée dispose séquentiellement l'information provenant des  $n$  portes d'entrée sur le bus. En fonction de l'adresse des destinataires, la cellule est véhiculée ou non vers les portes de sortie. Le système est conçu de façon que, à chaque changement d'information sur le bus, une mémoire soit toujours disponible sur chaque sortie pour recevoir la cellule. Une mémoire de sortie doit impérativement être libérée entre deux pas successifs de scrutation en entrée, ce qui suppose un nombre de mémoires suffisant en sortie et un contrôle entre les entrées et les sorties.

La figure 31.21 illustre le scrutateur d'entrée, les modules d'entrée et de sortie et un distributeur d'horloge.

**Figure 31.21**

*Schéma de fonctionnement d'un commutateur temporel statistique en bus*



Le scrutateur d'entrée a pour fonction de prendre l'information contenue dans la porte d'entrée et de la déposer sur le bus, en synchronisation avec un signal d'horloge. Lors du top d'horloge suivant, une nouvelle entrée est scrutée, et sa cellule est insérée sur le bus.

Le rôle du module de sortie est d'extraire l'information qui lui est destinée et de la charger en parallèle dans le registre de sortie. Celui-ci est composé de 424 bits plus un bit PI (Presence Information). Tous les registres de sortie reçoivent le contenu du bus, mais seuls sont sélectionnés ceux qui correspondent au décodage d'adresse. Chaque sortie dispose d'un distributeur d'adresses, de telle sorte que, dès qu'une mémoire de sortie est chargée, une nouvelle mémoire libre est connectée.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une classification des commutateurs. Cette classification repose sur les architectures de commutateurs proposées par les équipementiers de télécommunications.

Ces commutateurs forment également le cœur des équipements que l'on trouve dans les réseaux MPLS et dans les très gros routeurs IP. Qu'il s'agisse d'un commutateur, d'un LSR ou d'un routeur, il faut, une fois la porte de sortie choisie, acheminer l'entité paquet, trame ou cellule vers sa ligne de sortie. Les commutateurs construits pour le monde ATM étant les plus puissants et les moins chers, il n'est pas difficile de comprendre que tous les équipements qui ont pour fonction d'aiguiller des paquets, trames ou cellules utilisent les techniques provenant du monde ATM.

## Autres équipements

---

Pour contrecarrer le développement un peu anarchique et la prolifération des solutions réseau constructeur, le modèle de référence a eu pour objectif la standardisation des architectures réseau. L'objectif visé était d'éviter de passer d'une architecture à une autre par le biais de passerelles, toujours coûteuses et complexes à mettre en œuvre.

Les interfaces IP ont résolu en grande partie le problème de l'hétérogénéité des infrastructures réseau. Cependant, les solutions pour transporter un paquet IP restent très diverses, que ce soit à l'intérieur d'une entreprise ou dans un réseau d'opérateur. De plus, l'interconnexion doit également se faire dans les niveaux hauts de l'architecture.

Cela explique pourquoi l'interconnexion de technologies différentes rend nécessaire le recours à des passerelles permettant de relier différentes catégories de réseaux. Avec la multiplication des réseaux, Internet, mobiles, sans fil, etc., à laquelle on assiste depuis quelques années, ces passerelles sont devenues indispensables, tant pour les constructeurs que pour les utilisateurs.

De plus, les équipements intermédiaires que l'on rencontre le long d'un chemin pour résoudre des problèmes spécifiques sont également en plein développement, comme les pare-feu et les appliances en tout genre permettant d'assurer le contrôle du trafic ou la répartition de charge.

La convergence fixe-mobile est une autre raison importante de la multiplication des passerelles, même si les systèmes que l'on met en place depuis 2007 permettent souvent d'exécuter les mêmes applications sur un terminal mobile et sur un terminal fixe. C'est en particulier l'objectif de l'IMS (IP Mobile SubSystem). Les nouveaux réseaux sans fil demandent de surcroît des machines intermédiaires pour gérer les cellules, à l'image des contrôleurs, que nous détaillons dans ce chapitre.

## Les passerelles

On ne peut plus concevoir un réseau sans un passage vers l'extérieur. Il faut interconnecter les réseaux pour qu'ils puissent s'échanger des informations. Le nœud qui joue le rôle d'intermédiaire s'appelle une passerelle, ou gateway (terme générique). Ce nœud intermédiaire peut être plus ou moins complexe, suivant la ressemblance ou la dissemblance des deux réseaux à interconnecter. Si les deux réseaux sont identiques, la passerelle est extrêmement simple. À l'inverse, si les deux architectures à interconnecter sont dissemblables, les moyens à mettre en œuvre deviennent vite lourds et complexes.

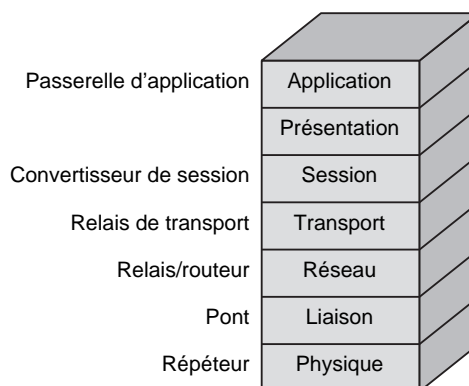
Si l'on s'en tient strictement à la définition d'une passerelle, on peut réaliser une interconnexion de réseaux à n'importe quel niveau de l'architecture du modèle de référence. Cependant, la règle générale est la suivante : l'utilisation d'une passerelle de niveau  $N$  est nécessaire lorsque les couches inférieures à  $N$  sont différentes mais que toutes les couches, à partir de la couche  $N + 1$ , sont identiques.

Les trois catégories de passerelles les plus répandues sont les ponts, les routeurs et les relais. On distingue également les ponts-routeurs (bridge-routeurs), qui, bien que non normalisés, sont largement utilisés.

Une hiérarchie de noms a été définie pour prendre en compte le niveau de l'interconnexion en se référant au modèle de référence. Ces différents niveaux sont illustrés à la figure 32.1. Un répéteur est une passerelle de niveau 1, ou physique ; un pont est une passerelle de niveau 2, ou trame ; un relais est une passerelle de niveau 3, ou paquet ; un relais de transport est une passerelle de niveau 4, ou message, etc.

Figure 32.1

*Hiérarchie des passerelles*



Les termes « commutateur » et « routeur » ne sont pas liés à un niveau. Un commutateur est un organe de type pont lorsque la commutation est effectuée au niveau 2 et de type relais lorsqu'elle est effectuée au niveau 3. Par exemple, un commutateur Ethernet est de type pont tandis qu'un commutateur X.25 est un relais. De même, un routeur est de type pont lorsque le routage est effectué au niveau 2 et de type relais lorsque le routage est effectué au niveau 3. Le terme « routeur » a été tellement associé au routage IP de niveau 3 qu'il semble naturel d'utiliser ce terme pour indiquer un relais de niveau paquet. Cela n'est toutefois exact que pour le monde IP, qui représente tout de même quasiment 99 % des relais de niveau 3. C'est la raison pour laquelle nous avons indiqué à la figure 32.1 le mot routeur à côté du mot relais pour exprimer que la quasi-totalité des relais sont des routeurs IP.

## Les répéteurs

Un répéteur est une passerelle de niveau physique entre deux réseaux comportant un niveau trame commun. Par exemple, un répéteur Ethernet est un équipement qui répète automatiquement les trames d'un brin Ethernet vers un autre brin Ethernet.

Le rôle du répéteur est d'envoyer une trame plus loin que ne le permet un simple câble, dont la longueur est limitée par l'atténuation du signal. Si nous prenons l'exemple d'Ethernet à 10 Mbit/s, un câble coaxial blindé ne peut permettre de dépasser une longueur de 500 m sous peine de voir le taux d'erreur devenir inacceptable.

Regardons plus précisément le cas du réseau Ethernet. Nous savons que la longueur maximale d'un réseau Ethernet est limitée à 2,5 km (*voir le chapitre 16*), puisque le temps de propagation d'une extrémité à l'autre du support physique ne peut dépasser 51,2  $\mu$ s. La question est de savoir comment atteindre ces 2,5 km si la longueur maximale d'un brin ne peut excéder 500 m. La réponse est simple : il suffit de connecter des brins les uns aux autres en utilisant des répéteurs.

Les répéteurs n'empêchent pas les collisions mais rendent difficile leur répétition sur le brin suivant. En effet, un répéteur n'est pas autre chose qu'un registre à décalage, c'est-à-dire un ensemble de registres dans lesquels les informations sous forme de 0 et de 1 viennent se mémoriser et se décalent pour laisser entrer un nouvel élément binaire. Le registre d'entrée s'attend à recevoir un 0 ou un 1 et non un signal provenant d'une superposition. Il est donc très difficile de répéter des signaux qui ne sont ni des 0 ni des 1. C'est la raison pour laquelle les répéteurs remplacent les éléments en collision par une série de bits spécifiques permettant aux autres stations de détecter la collision.

Les répéteurs peuvent éventuellement changer de support physique tout en respectant la structure de la trame en cours d'acheminement. Par exemple, on peut passer d'un support métallique à une fibre optique ou à un support hertzien d'un réseau sans-fil. C'est la raison pour laquelle il est possible de réaliser des réseaux Ethernet ayant des parties métalliques, optiques et hertziennes.

En résumé, un répéteur est un organe inintelligent qui permet d'allonger la longueur du support physique, au contraire d'un pont, qui filtre les messages sur leur adresse de destination.

## Les ponts

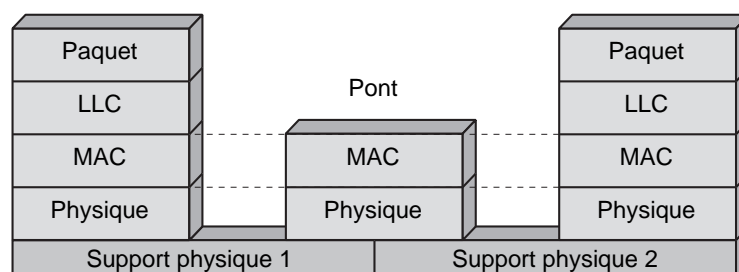
Le pont, ou bridge, est une passerelle de niveau 2. Cet équipement de réseau assez simple à mettre en œuvre a beaucoup évolué depuis l'apparition des premiers réseaux Ethernet.

Un pont unit des réseaux proches ou distants en remontant jusqu'au niveau trame. Il reçoit une trame et calcule la ligne de sortie grâce à un algorithme de routage ou à la table de commutation. Il filtre les trames reçues en examinant l'adresse de niveau 2 et en ne laissant passer que les trames destinées à l'extérieur.

L'architecture d'un pont est illustrée à la figure 32.2. Le pont crée un réseau virtuel à partir d'un ensemble de sous-réseaux, en ignorant les protocoles des couches supérieures. Les couches MAC peuvent être compatibles ou non. Dans le premier cas, le pont est conçu pour relier des réseaux de même type (Ethernet, Token-Ring, etc.). Dans le second cas, il faut remonter au niveau supérieur, c'est-à-dire à la couche LLC commune puis

réencapsuler la trame LLC dans la couche MAC. Le niveau physique pouvant être différent d'un sous-réseau à un autre, on peut qualifier le pont d'interconnexion de deux ou plusieurs supports physiques.

**Figure 32.2**  
*Architecture d'un pont*



Le pont enregistre dans des tables internes les adresses de toutes les stations connectées au réseau. Si une station est ajoutée ou enlevée, le système doit être reconfiguré. C'est la raison pour laquelle les ponts ne peuvent *a priori* être utilisés que dans des environnements bien localisés. Dès que le nombre de stations est important, la gestion des adresses devient très complexe.

L'interconnexion de sous-réseaux par des ponts permet des débits élevés, puisque le nombre de niveaux à traverser est petit et qu'on ne remonte que d'un niveau pour arriver au niveau trame. Les passerelles de niveau paquet, ou relais, sont moins puissantes puisque, à chaque passage d'un relais, il faut traverser les niveaux 1 puis 2 pour arriver au niveau 3.

Deux grands protocoles de routage de niveau pont, le Source-Routing et le Spanning-Tree, ont été développés respectivement pour les réseaux Token-Ring et Ethernet. Ces protocoles sont toujours utilisés mais parfois pour d'autres catégories de réseaux.

## Le protocole Source-Routing

Normalisé par le comité IEEE 802.5, le protocole Source-Routing a été utilisé au départ pour l'interconnexion de réseaux Token-Ring. Ce protocole est toujours fortement utilisé dans d'autres contextes, aussi bien issus des réseaux IP que des réseaux locaux.

Lorsqu'une station X veut envoyer des informations à une station Y, elle envoie en diffusion une trame de découverte du chemin. Un pont qui voit arriver une trame de ce type y ajoute sa propre adresse et retransmet cette trame vers tous les réseaux, à l'exception de celui par lequel la trame est arrivée. La station destination Y voit donc arriver une ou plusieurs trames et retourne à X toutes les trames reçues en utilisant les informations d'acheminement trouvées dans chacune. Ensuite, X peut utiliser les routes que le protocole lui a permis de découvrir. Son choix est guidé par divers paramètres, tels que délais d'acheminement, nombre de ponts traversés, longueur de trame permise, etc.

Les trames constituées par chaque station présentent la structure suivante : elles commencent par l'adresse de destination, suivie de l'adresse source, des informations de routage, de l'adresse DSAP (Destination Service Access Point), de l'adresse



SSAP (Source Service Access Point), des données de contrôle et enfin des données à transporter, pour se terminer par une zone FCS (Frame Check Sequence). Cette suite s'exprime par la séquence :

@Dest.~@Source~Info-routage~DSAP~SSAP~Contrôle~Données~FCS.

La longueur des adresses destination et source est de 2 ou 6 octets, et celle de chaque élément de l'information de routage de 2 octets.

## Le protocole *Spanning-Tree*

Normalisé par le comité IEEE 802.1, le protocole *Spanning-Tree* est prévu pour l'interconnexion de tout type de réseau. Il consiste en la constitution, à partir de n'importe quelle topologie, d'un arbre qui recouvre parfaitement le réseau et dans lequel, à partir de n'importe quelle feuille de l'arbre, tout point du réseau est accessible.

Pour le bon fonctionnement du protocole, le réseau doit satisfaire aux conditions suivantes :

- Une identification unique (ID) doit être associée à chaque pont du réseau.
- Le pont ayant le plus petit ID doit être choisi comme racine de l'arbre.

Les ponts échangent des messages appelés Hello, dans lesquels ils indiquent leur ID ainsi que l'ID du pont qu'ils considèrent comme la racine de l'arbre par lequel doivent transiter leurs trames. Lorsqu'ils reçoivent une ID inférieure à celle désignée comme leur pont racine, ils rectifient l'ID du pont qui leur sert de racine pour prendre la nouvelle valeur. En d'autres termes, ils déterminent un nouveau pont racine. Avec le temps, chaque pont finit par déterminer la racine de l'arbre, c'est-à-dire le pont racine. Ensuite, chaque pont calcule la distance qui le sépare de la racine. Cette distance est calculée de proche en proche : à chaque pont traversé les distances sont incrémentées de 1.

Sur chaque réseau physique, un pont est choisi comme étant le plus proche de la racine. Si deux ponts d'un même réseau sont à la même distance de la racine, la plus petite ID est choisie. Tout le trafic issu de ce réseau et à destination d'un autre réseau physique passe par ce pont, appelé pont élu. Grâce à ce protocole, tout réseau physique est assimilable à un arbre virtuel, et il n'existe pas de boucle dans le réseau.

On peut reprocher à ce protocole des performances éventuellement dépendantes de la topologie du réseau. De plus, si les ID des ponts ne sont pas définies par le gestionnaire du réseau mais par le constructeur, le pont élu comme racine est indépendant de la volonté du gestionnaire et peut constituer un goulet d'étranglement.

## Les relais-routeurs

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, « relais » est le terme normalisé pour indiquer une passerelle de niveau 3, ou paquet. Comme le monde IP a maintenant quasiment l'exclusivité du niveau 3, la tendance est d'utiliser le terme « routeur » pour exprimer un relais de niveau paquet IP. Malheureusement, ce terme peut prêter à confusion lorsqu'on parle d'un routeur de niveau trame. Le concept de routeur n'est pas lié à un niveau mais à une technologie. Parler de routeur, c'est donc le plus souvent parler de

routeur IP, et c'est ce que nous allons faire dans ce chapitre. Cependant, il faut se rappeler qu'un routeur de niveau 2 est imaginable, même si ce n'est pas un cas classique, si les trames contiennent l'adresse complète du destinataire. Pour l'étude des routeurs nous renvoyons le lecteur au chapitre 31.

## Les routeurs multiprotocoles

Les routeurs multiprotocoles se distinguent par l'éventail de protocoles réseau gérés ainsi que par le nombre et le type des interfaces réseau supportées. Ces produits sont relativement complexes, ce qui explique qu'un faible nombre de sociétés se soit spécialisé dans ces routeurs.

Un routeur multiprotocole possède plusieurs interfaces de niveau trame et plusieurs protocoles de niveau paquet. Lorsque la trame se présente dans le routeur, elle est décapsulée de façon que le paquet soit récupéré. Après examen de la zone d'adresse du paquet, celui-ci peut être transcodé dans le format paquet d'un autre protocole avant d'être encapsulé dans une nouvelle structure de trame.

Les routeurs multiprotocoles peuvent supporter un pont-routeur, ou bridge-router (*voir plus loin*). Le nœud peut dans ce cas reconnaître la référence ou l'adresse de niveau trame et router ou commuter la trame sans remonter au niveau paquet. Si la référence ou l'adresse de niveau trame n'est pas reconnue, on passe au niveau paquet pour router le paquet sur l'adresse de niveau 3.

À la différence d'un pont, un routeur peut isoler certains segments du réseau et créer des domaines. Il permet d'offrir une bonne isolation entre chaque réseau connecté, évitant ainsi la propagation des signaux émis en broadcast. Actuellement, les vitesses atteintes par les routeurs d'entreprise sont de 10 000 à 15 000 paquets/s et avoisinent souvent les 100 000 paquets/s. Du fait de l'augmentation constante des débits des applications, il a fallu, à la fin des années 1990, se pencher sur la conception de routeurs beaucoup plus puissants, en particulier pour les opérateurs, capables de router d'un à mille millions de paquets par seconde. Nous les détaillons à la section suivante.

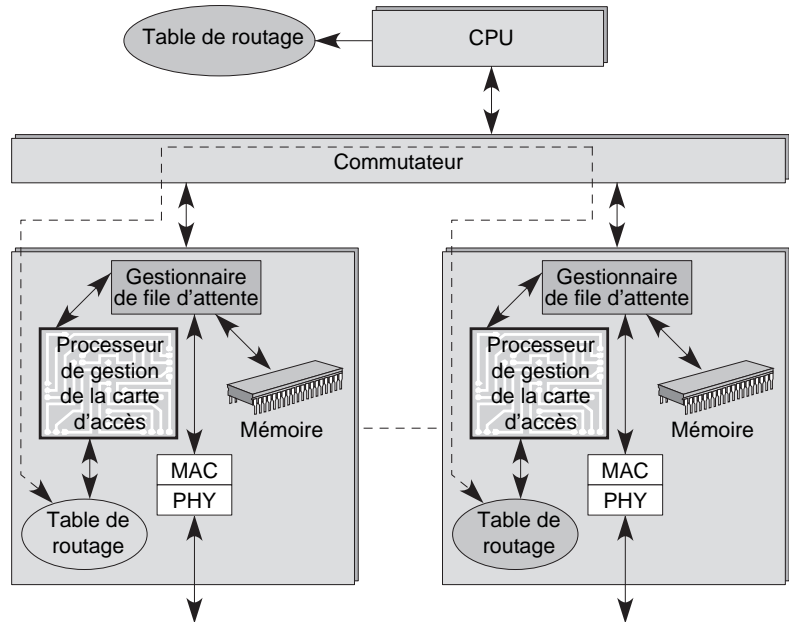
## Les gigarouteurs

La nouvelle génération de routeurs haut débit, appelés gigarouteurs ou térarouteurs, repose sur une distribution de la table de routage et du traitement du paquet dans l'interface d'accès puis sur l'utilisation d'un commutateur pour transporter le paquet d'un port d'entrée vers un port de sortie.

La figure 32.3 donne une idée de l'architecture d'un gigarouteur. Les gigarouteurs permettent aux ports d'accès d'atteindre des vitesses de 2,5 Gbit/s. On parle de térarouteur pour des vitesses de 10 à 40 Gbit/s. La transmission de paquets IP à ces vitesses est exploitée aujourd'hui par les techniques IP sur SONET et IP sur WDM ou MPLS.

Les commutateurs forment le cœur des routeurs très haut débit pour permettre de réaliser des accès à plusieurs centaines de mégabits voire de gigabits par seconde.

Figure 32.3

*Architecture d'un gigarouteur*

## Les bridge-routers

Les bridge-routers, aussi appelés b-routeurs ou ponts-routeurs, ont pour rôle d'allier le meilleur des deux technologies. Ils intègrent, selon les produits, les trois couches basses, physique, liaison et paquet, et essaient d'agir sur le niveau liaison lorsqu'ils en ont la possibilité, faute de quoi ils remontent au paquet pour traiter l'adresse de niveau paquet. En d'autres termes, les bridge-routers reçoivent une trame qui est traitée comme si l'organe était un pont. Si le pont de niveau trame ne permet pas de déterminer la direction dans laquelle il faut envoyer la trame, celle-ci est décapsulée pour récupérer le paquet qu'elle transporte dans sa zone de données. La passerelle a maintenant un paquet à examiner, et elle joue le rôle de passerelle de niveau 3 qui est généralement un routeur IP.

Le bridge-router est un organe assez complexe puisqu'il demande une gestion des tables de niveau trame et de niveau paquet. En revanche, c'est un équipement très performant du point de vue des possibilités de traitement des références et des adresses.

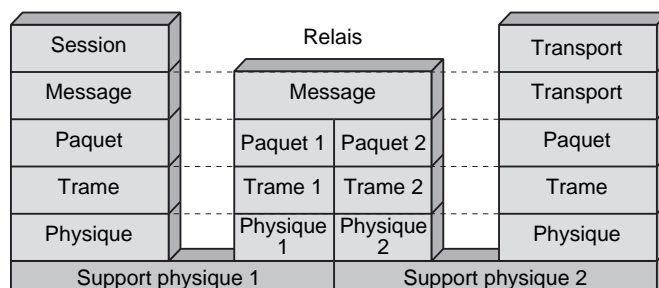
## Les relais de transport

Les relais de transport se situent au niveau 4 de l'architecture du modèle de référence. Leur utilisation est recommandée lorsqu'on veut interconnecter des réseaux de niveau message différents. Par exemple, si l'on veut interconnecter une communication sous TCP et une autre sous UDP, il faut passer par des relais de transport. Ces relais peuvent être aussi appelés des routeurs de niveau message, ou routeurs de niveau 4. Il faut en effet remonter jusqu'au niveau transport pour reconstituer le message et examiner l'adresse du niveau correspondant, c'est-à-dire l'adresse qui se trouve dans le message. En pratique, la gamme de leur utilisation est moins variée, et il existe peu de produits de ce type sur le marché.

L'architecture d'un relais est illustrée à la figure 32.4.

**Figure 32.4**

*Architecture d'un relais*



## Les techniques de tunneling

Les techniques d'interconnexion que nous avons rencontrées jusqu'à présent ne concernent que la translation : on translate l'information à transporter d'une trame vers une autre trame ou d'un paquet vers un autre paquet. Une autre méthode, totalement différente, appelée encapsulation, consiste à placer une trame à l'intérieur d'une autre trame ou un paquet à l'intérieur d'un autre paquet.

Par exemple, l'interconnexion d'un réseau IPv6 avec un réseau IPv4 peut se faire de la façon suivante. Supposons qu'un client IPv6 souhaite transmettre un paquet IPv6 à un client qui travaille sur une machine terminale IPv6. Supposons également que le seul réseau qui interconnecte ces deux machines soit l'Internet de type IPv4. Une première solution serait de faire une translation, c'est-à-dire de transférer l'intérieur du paquet IPv6 dans le paquet IPv4 et, à l'arrivée, de transférer à nouveau le contenu du paquet IPv4 dans un paquet IPv6. Cette solution est possible mais complexe, car il faut redéfinir complètement les zones de supervision des paquets traduits. C'est la raison pour laquelle on préfère utiliser une autre méthode : dans la machine terminale de l'émetteur, on encapsule le paquet IPv6 à l'intérieur d'un paquet IPv4. Le paquet IPv4 est transporté sur Internet, et, à l'arrivée, on décapsule le paquet IPv4 pour retrouver le paquet IPv6. On a en fait utilisé le réseau IPv4 comme un tunnel.

Pour interconnecter deux réseaux sans recourir à une passerelle, l'utilisation d'un tunnel est classique. C'est ce qu'on appelle faire du tunneling.

### *Translation et encapsulation*

Les deux principaux niveaux d'interconnexion sont, comme nous l'avons vu :

- le niveau liaison, avec des ponts ;
- le niveau réseau, avec des routeurs.

Si l'on reste au niveau pont, deux solutions sont envisageables : la translation et l'encapsulation.

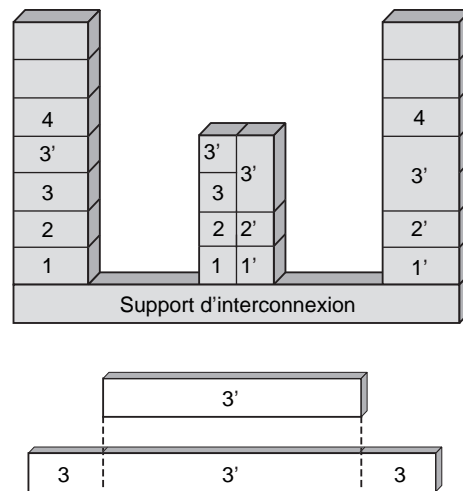
Dans la translation, les adresses source et destination des stations terminales sont véhiculées dans les en-têtes. Dans l'encapsulation, une trame complète venant du réseau local est

incluse dans la trame du réseau qui va servir de tunnel. Cette méthode ne demande pas de traitement de la trame, mais, comme elle n'est pas normalisée, elle présente l'inconvénient de se restreindre à un monde homogène, c'est-à-dire d'aller d'une station terminale avec un protocole X à une station terminale utilisant le même protocole X.

La figure 32.5 illustre l'architecture d'une technique d'encapsulation de niveau paquet. On suppose qu'une machine terminale d'une entreprise utilise le protocole IPv6 et qu'elle veuille se connecter à réseau local IPv6. Le client est représenté par la pile de gauche et l'entreprise par la pile de droite. Le protocole indiqué avec la valeur 3' est donc IPv6. Pour interconnecter cette station et le réseau local, seul le réseau Internet IPv4 est disponible. IPv4 est représenté par le protocole indiqué par la valeur 3. La station terminale encapsule son paquet IPv6 (protocole 3') dans un paquet IPv4 (protocole 3). Ce paquet IPv4 est transporté sur Internet jusqu'au routeur d'accès de l'entreprise, qui est symbolisé par la pile de protocoles du milieu. Dans ce routeur, le paquet IPv4 (protocole 3) est décapsulé pour retrouver le paquet IPv6 (protocole 3'). Ce paquet IPv6 est ensuite transporté en IPv6 dans le réseau local, représenté par la partie droite du schéma.

**Figure 32.5**

*Encapsulation de niveau paquet*



La même solution s'offre au concepteur de réseau pour interconnecter des machines IPv4 par l'intermédiaire d'un réseau IPv6. Il suffit d'encapsuler le paquet IPv4 dans le paquet IPv6 puis, à l'arrivée, de décapsuler le paquet IPv6 pour retrouver le paquet IPv4.

Les deux solutions d'encapsulation sont comparables. Celle qui sera la plus pratiquée dépendra de la façon de passer d'IPv4 à IPv6. Une première solution consiste à supposer qu'un opérateur se décide à proposer un réseau IPv6 pour effectuer le transfert des paquets pour la simple raison qu'avec IPv6 il pourra offrir plus de services à ces clients qu'avec IPv4. Les clients resteront sûrement encore quelque temps en IPv4 avant de passer en IPv6. Il suffira alors d'encapsuler les paquets IPv4 dans les paquets IPv6 de l'opérateur. Maintenant, si ce sont les clients qui décident de passer en IPv6 — parce qu'ils peuvent indiquer plus d'informations dans leurs zones de supervision — mais que les opérateurs restent en IPv4, on aura des encapsulations de paquets IPv6 dans des paquets IPv4.

## Les pare-feu

Les fonctionnalités des pare-feu sont analysées en détail au chapitre 39. Nous introduisons dans ce chapitre ces équipements réseau car ils deviennent de plus en plus nécessaires dans les réseaux d'aujourd'hui, même pour un particulier dès lors qu'il se rattache à Internet.

Un pare-feu, ou coupe-feu ou encore firewall, est, comme son nom l'indique, un équipement dont l'objectif est de séparer le monde extérieur du monde intérieur à protéger. Son rôle est de ne laisser entrer que les paquets dont l'entreprise est sûre qu'ils ne posent pas de problème.

Les pare-feu offrent de nombreuses fonctions, dont la principale est de trier ce qui entre ou ce qui sort et de décider d'une action lorsque la reconnaissance a été effectuée. Les actions peuvent aller du rejet du paquet, à sa compression-décompression, en passant par son examen par un antivirus, son ralentissement, son accélération, etc.

Divers moyens sont mis en œuvre pour reconnaître un paquet et plus généralement le flot, comme la reconnaissance de l'application qui transite par le coupe-feu, l'adresse de destination ou l'adresse source, la machine et l'application sur laquelle le distant veut se connecter, etc.

Les pare-feu se distinguent par le niveau auquel ils travaillent. En règle générale, ils sont de niveau 4, ou message : on essaie de trouver dans le message de niveau TCP un moyen de reconnaître l'application. Les utilisateurs se différencient par leurs adresses source et destination mais surtout, dans la première génération, par le numéro de port, qui indique l'application en cours. Par exemple, le port 80 indique une application HTTP. Cependant, les numéros de port sont de moins en moins fiables car les attaquants se servent des ports ouverts et souvent du port 80 en utilisant le protocole HTTP comme d'une capsule dans laquelle ils intègrent leur message. Le concept de numéro de port est introduit aux chapitres 9 et 10 pour IP et TCP.

L'utilisation de numéro de port est assez restrictive, dans la mesure où de plus en plus d'applications possèdent des ports dynamiques, comme FTP, la plupart des applications P2P (Peer-to-Peer) ou les signalisations téléphoniques. De plus, deux clients peuvent déterminer entre eux un numéro de port sur lequel ils souhaitent communiquer.

L'évolution des pare-feu a consisté à monter dans les couches de protocoles de façon à atteindre la couche application afin de pouvoir déterminer l'application en cours. On appelle pare-feu applicatif, ou pare-feu de niveau 7, les pare-feu qui sont capables de distinguer clairement les applications. Si le reproche longtemps adressé aux pare-feu était de prendre beaucoup de temps et de ne pas être capables de déterminer les applications au fil de l'eau, cela n'est plus vrai aujourd'hui. Les produits de pare-feu applicatifs introduits sur le marché depuis quelque temps ne prennent pas plus de temps que la plupart des équipements réseau rencontrés dans le monde IP. Nous pouvons citer le cas du boîtier QoS MOS, qui est capable de filtrer et de déterminer les applications dans un laps de temps très court, de telle sorte que la sortie des paquets n'est retardée que d'un temps maximal égal au temps de traversée d'un routeur courant.

Le pare-feu s'installe souvent dans un boîtier dédié pour simplifier sa mise en œuvre, mais il peut également se trouver en différents points du réseau, allant du routeur au commutateur, en passant par un serveur spécialisé ou le poste client.

## Les proxy

Les proxy permettent de rompre avec le modèle classique client-serveur d'une communication en interdisant une connexion directe du client au serveur. Il existe deux types principaux de proxy, les proxy de type applicatif et les proxy de type circuit.

Les proxy applicatifs interviennent au niveau 7, ou application, avec pour objectif de casser le modèle client-serveur pour passer au modèle client-client. Les seconds ne permettent pas une connexion TCP de bout en bout et sont plutôt destinés à du trafic sortant d'utilisateurs authentifiés.

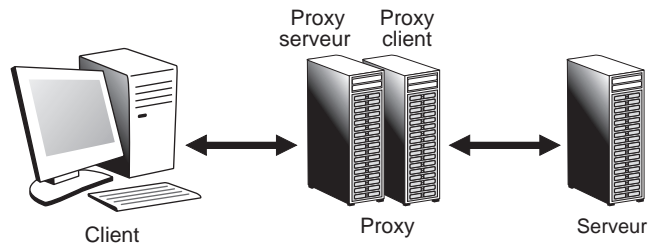
### Les proxy applicatifs

Comme expliqué précédemment, les proxy applicatifs interviennent au niveau application du modèle de référence. Leur objectif est de rompre avec le modèle client-serveur classique en le remplaçant par un double modèle client-serveur, comme illustré à la figure 32.6. La relation directe est coupée pour être remplacée par deux relations avec le proxy faisant la transition entre les deux relations c'est-à-dire entre le proxy jouant le rôle de serveur et le proxy jouant le rôle de client. En d'autres termes, une connexion TCP de bout en bout est remplacée par deux connexions mises bout à bout grâce au proxy.

Cette solution apporte une bonne sécurité puisqu'il faut exécuter l'application dans le proxy, ce qui permet de vérifier que le flot de paquets ne forme pas une attaque. On peut réaliser des pare-feu de type proxy qui sont équivalents à des pare-feu de niveau 7. L'inconvénient majeur de cette solution est la lourdeur et la difficulté d'obtenir de bonnes performances.

**Figure 32.6**

*Proxy applicatif*



### Les proxy circuit

Les proxy de type circuit ont pour objectif de vérifier que la suite de paquets sur un chemin, ou circuit virtuel, est conforme aux RFC correspondantes. En effet, beaucoup d'attaques s'effectuent en insérant dans le flux normal de paquets des paquets d'attaque. Avec un proxy circuit, les différents champs des paquets sont vérifiés afin de garantir qu'aucun paquet ne porte une attaque.

Cette solution offre également une bonne sécurité en demandant une authentification de l'utilisateur qui va utiliser le chemin, au début de sa connexion.

## Les appliances

Les appliances sont des boîtiers qui possèdent une ou plusieurs fonctions bien déterminées et qui s'insèrent facilement dans le réseau. L'avantage de ces boîtiers est généralement de pouvoir démarrer une nouvelle fonctionnalité sans avoir à programmer ni à

adapter les logiciels existants. Les appliances peuvent servir à la sécurité, et donc intégrer un pare-feu, mais aussi, par le biais de fonctionnalités spécifiques, à la gestion de la qualité de service.

Cette section est essentiellement consacrée aux appliances permettant d'effectuer de la surveillance de la qualité de service et de l'accélération de flux IP.

Les appliances sur la surveillance des flux permettent de déterminer les différents flux qui transitent sur Internet et, après reconnaissance, de les traiter. Les traitements peuvent être extrêmement divers suivant les boîtiers (perte, compression, mise en attente, accélération, etc.).

Pour la reconnaissance de flux, de nombreuses possibilités sont aujourd'hui disponibles, la plus classique consistant à utiliser les numéros de port. Cependant, comme les applications les plus modernes utilisent des ports dynamiques, cette solution s'avère parfois désastreuse du point de vue de la reconnaissance des flots et donc de la sécurité ou de la gestion des flots de paquets IP. Une solution, développée par la société QoS MOS, consiste à reconnaître les flots par leur grammaire, c'est-à-dire l'ensemble des règles à suivre pour réaliser l'écriture des messages applicatifs. Comme la grammaire est unique pour chaque application, il est possible de reconnaître un flot, même s'il est encapsulé dans d'autres flots, comme dans des tunnels L2TP. Une fois le flot reconnu, le boîtier peut effectuer une fonction décidée par le gestionnaire du réseau et programmée à l'avance.

On peut classer parmi les appliances les commutateurs ou les routeurs de niveau 4 ou 7, c'est-à-dire capables de commuter ou de router en fonction d'informations recueillies au niveau message ou applicatif. Par exemple, en fonction d'un numéro de port ou d'une reconnaissance de l'application, la décision de routage ou de contrôle peut différer.

Nous pouvons également ranger dans les appliances les accélérateurs de flots IP. Ces accélérateurs intègrent un moyen permettant de faire parvenir à l'émetteur une réponse plus rapidement ou d'effectuer un transfert de données, d'un point vers un autre, en moins de temps que sans accélérateur. Les accélérations peuvent s'effectuer aux différents niveaux de l'architecture. En règle générale, plus le niveau est bas, plus l'accélération globale est importante. À l'inverse, plus le niveau est haut, plus l'accélération est lente et destinée à des applications particulières. Par exemple, il est possible de compresser le flux de niveau 1, et de réduire ainsi le nombre de paquets à transmettre, ou de diminuer leur taille, ce qui entraîne une charge moindre à l'intérieur du réseau et donc un meilleur temps de transit. Au niveau 2, on peut concevoir des accélérateurs pour la correction d'erreur lorsque le taux d'erreur est important. Au niveau 3, on peut jouer sur les adresses IP et sur le contenu des en-têtes des paquets IP. Enfin, aux niveaux supérieurs, on peut travailler sur des applications particulières plutôt que sur toutes les applications simultanément, comme aux niveaux 1, 2 et 3.

Les appliances concernent également l'accélération par la mémorisation d'informations dans des caches intermédiaires, c'est-à-dire dans des mémoires tampons qui se situent relativement près des entrées du réseau des opérateurs. On met dans le cache soit des pages entières d'information, si celles-ci sont fortement demandées, de telle sorte qu'il ne soit pas nécessaire d'aller rechercher la page sur le serveur d'origine, qui peut se situer à l'autre bout de la terre. On peut également mémoriser une partie de la page et ne chercher que des informations complémentaires. Par exemple, pour une page Web qui



possède un fond assez gourmand en octets, seul le fond est gardé en un cache à proximité du client, et seules sont demandées au serveur les informations de type texte à mettre à jour. Les débits mesurés dans cette solution ne représentent que 5 à 20 % du débit total nécessaire au transport de la page complète.

## Les contrôleurs

Les contrôleurs forment une nouvelle génération de boîtiers dont l'objectif est de contrôler un certain nombre d'autres machines. Ils sont notamment utilisés pour la gestion des points d'accès dans les réseaux Wi-Fi.

Un contrôleur a pour rôle de rassembler des fonctionnalités auparavant réparties dans les différents points d'accès. Au lieu d'augmenter la complexité de ces derniers, on a préféré regrouper certaines de leurs fonctions dans le contrôleur. On y trouve notamment des éléments de gestion de la puissance d'émission des points d'accès, ainsi que de la fréquence à utiliser. Les fonctions de sécurité, telles qu'un serveur d'authentification, sont également gérées par le contrôleur. Les clients s'authentifient sur le contrôleur, lequel peut jouer le rôle de proxy pour un serveur d'authentification plus global de l'entreprise. Des fonctions de découverte de points d'accès pirates sont également souvent introduites dans les contrôleurs.

Le contrôleur possède bien entendu des fonctions de contrôle proprement dites, comme le contrôle des handovers, lorsque des clients passent d'une cellule à une autre cellule. Le handover peut être intra-contrôleur, les deux cellules étant gérées par le même contrôleur, ou inter-contrôleur, lorsque les deux cellules n'appartiennent pas au même contrôleur.

Le contrôleur peut posséder de nombreuses fonctions de gestion du nomadisme. Par exemple, le contrôleur Ucopia illustré à la figure 32.7 implémente de nombreuses fonctionnalités, notamment les suivantes :

- gestion de la sécurité par une authentification par portail captif, certificat, carte CPS ;
- identification de l'utilisateur, du poste et des conditions de connexion et contrôle d'accès par profil métier ;
- traçabilité en suivant les lois 2001-1062, 2003-237, LCT du 23 mars 2006 ;
- accès nomade zéro configuration ;
- gestion des personnels permanents ou de passage et des visiteurs ;
- intégration des annuaires, VLAN, VPN, PKI, carte CPS, etc.
- supervision et l'administration centralisée multisite et redondance pour des raisons de disponibilité ;
- indépendance et évolutivité des équipements réseau ;
- gestion simultanée des connexions filaires et sans fil ;
- gestion des points d'accès hétérogènes Wi-Fi a/b/g/n et WiMAX ;
- provisionnement du service (forfait jour, crédit temps).

Les contrôleurs de communication sont amenés à se développer de plus en plus pour prendre en charge des fonctions communes à l'intérieur d'un réseau et décharger les autres équipements de ces fonctions.

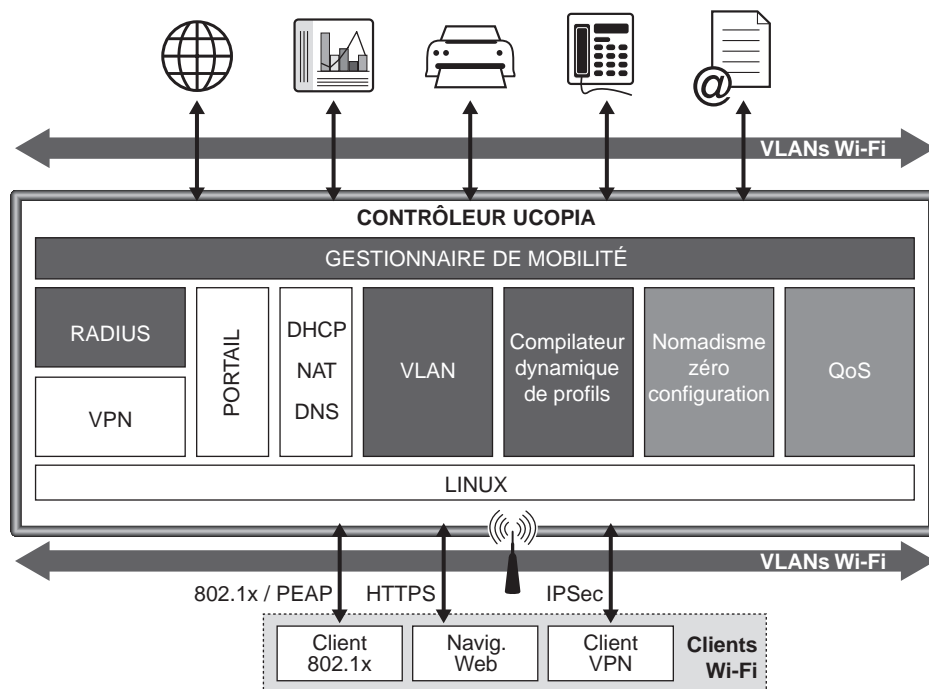


Figure 32.7

Fonctions d'un contrôleur Ucopia

## Conclusion

La convergence au niveau paquet vers la technologie IP n'empêche pas une persistance des techniques d'interconnexion de réseaux. En effet, au niveau trame, une forte diversité existe encore entre les trames ATM, Ethernet, LAP-F, PPP et Ethernet. De même, au niveau paquet, la percée d'IPv6 va demander des interconnexions IPv4-IPv6 pendant un certain temps encore.

La tendance des grands opérateurs est de faire converger tous leurs réseaux cœur (réseau téléphonique, réseaux de données, réseaux cœur des réseaux de mobiles, etc.) vers un réseau unique de transport de paquets IP. Pour acheminer ces données, les paquets IP sont soit routés dans des routeurs, soit encapsulés dans des trames, pour être le plus souvent commutés. Pour permettre une sécurité du transport de ces paquets, de nombreuses solutions sont commercialisées avec plus ou moins de puissance et de succès.

Nous avons vu que les appliances offraient diverses fonctions tout en restant généralement simples à mettre en œuvre. Leur rôle principal est d'améliorer les performances du réseau par des moyens extrêmement divers.