2

Architecture des réseaux

Le transport des données d'une extrémité à une autre d'un réseau nécessite un support physique ou hertzien de communication. Pour que les données arrivent correctement au destinataire, avec la qualité de service, ou QoS (Quality of Service), exigée, il faut en outre une architecture logicielle chargée du contrôle des paquets dans le réseau.

L'architecture TCP/IP d'Internet a aujourd'hui supplanté complètement les autres architectures. Cependant, l'architecture OSI (Open Systems Interconnection) provenant de la normalisation de l'ISO (International Standardization Organization) demeure le modèle de référence et la numérotation des couches reste le standard pour s'y retrouver. Nous utiliserons dans la suite de cet ouvrage, les couches OSI et plus régulièrement les couches provenant du modèle TCP/IP.

Le présent chapitre détaille ces deux architectures, en commençant par celle introduite par l'ISO il y a une trentaine d'années et qui constitue toujours le modèle de référence pour décrire les éléments nécessaires à la réalisation d'une architecture réseau. Nous examinons ensuite les architectures dites *crosslayer*, qui regroupent toutes les fonctionnalités dans une seule couche.

Le modèle de référence

Les concepts architecturaux utilisés pour décrire le modèle de référence à sept couches proposé par l'ISO sont décrits dans la norme ISO 7498-1. La figure 2.1 illustre cette architecture.

Une couche correspond à un ensemble de protocoles destinés à réaliser le service qui lui est associé. On parle également de niveau qui fait référence dans ce cas à l'entité traitée dans la couche (élément binaire, trame, paquet, message, connexion, syntaxe, sémantique). On numérote les couches et les niveaux de 1 à 7 pour les référencer facilement.

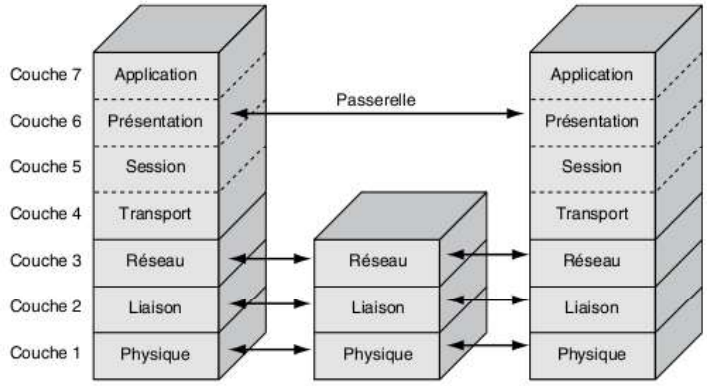

Figure 2.1

L'architecture OSI

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 MPLS utilise une commutation, tandis qu'Internet préfère le routage. Ethernet peut utiliser le routage, mais il est également possible de commuter les trames Ethernet. La première solution est plutôt orientée entreprise tandis que la seconde est destinée aux opérateurs de télécommunications.

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 en fonction du niveau auquel s'effectue le transfert.

Les couches du modèle de référence

Le modèle de référence OSI comporte sept niveaux protocolaires plus un médium physique. Le médium physique, que l'on appelle parfois le niveau 0, correspond au support physique de communication chargé d'acheminer les éléments binaires d'un point à un autre jusqu'au récepteur final. Ce médium physique peut prendre diverses formes, allant du câble métallique aux signaux hertziens, en passant par la fibre optique et l'infrarouge.

La couche 1 (physique), ou niveau élément binaire

La couche physique contient les règles et procédures à mettre en œuvre pour acheminer les éléments binaires sur le médium physique. On trouve dans la couche physique les équipements réseau qui traitent l'élément binaire, comme les modems, concentrateurs, ponts, hubs, etc.

Les différentes topologies de support physique affectent le comportement de la couche physique. Dans les entreprises, les plans de câblage ont une importance parfois déterminante pour le reste de l'architecture. La couche physique nécessite de surcroît un matériel fiable, et il faut parfois dupliquer ou mailler le réseau pour obtenir des taux de défaillance acceptables.

La couche 2 (liaison), ou niveau trame

La trame est l'entité transportée sur les lignes physiques. Elle contient un certain nombre d'octets transportés simultanément. Le rôle du niveau trame consiste à envoyer un ensemble d'éléments binaires sur une ligne physique de telle façon qu'ils puissent être récupérés correctement par le récepteur. Sa première fonction est de reconnaître, lors de l'arrivée des éléments binaires, les débuts et fins de trame. C'est là, aujourd'hui, le rôle principal de cette couche, qui a été fortement modifiée depuis son introduction dans le modèle de référence.

Au départ, elle avait pour fonction de corriger les erreurs susceptibles de se produire sur le support physique, de sorte que le taux d'erreur résiduelle reste négligeable. En effet, s'il est impossible de corriger toutes les erreurs, le taux d'erreur non détectée doit rester négligeable. Le seuil à partir duquel on peut considérer le taux d'erreur comme négligeable est dépendant de l'application et ne constitue pas une valeur intrinsèque.

Appréciation du taux d'erreur

Pour une communication téléphonique, un taux d'erreur d'un bit en erreur pour mille bits émis ne pose pas de problème, l'oreille étant incapable de déceler ces erreurs. En revanche, lors du passage d'une valeur sur un compte bancaire, une erreur en moyenne sur 1 000 bits peut devenir catastrophique. Dans ce cas, il faut descendre à un taux d'erreur de 10^{-18}, c'est-à-dire d'une erreur en moyenne tous les 10^{18} bits émis, ce qui représente, sur une liaison à 1 Gbit/s, une erreur en moyenne tous les deux cents jours ou, à la vitesse de 1 Mbit/s, une erreur tous les cinq cents ans. On peut en conclure qu'un même support physique peut être acceptable pour certaines applications et pas pour d'autres.

La solution préconisée aujourd'hui pour traiter les erreurs est d'effectuer la correction d'erreur non plus au niveau trame, mais au niveau application. Pour chaque application, on peut déterminer un taux d'erreur limite entre l'acceptable et l'inacceptable. Comme les médias physiques sont de plus en plus performants, il est généralement inutile de mettre en œuvre des algorithmes complexes de correction d'erreur. En fait, seules les applications pour lesquelles un taux d'erreur donné peut devenir inacceptable doivent mettre en place des mécanismes de reprise sur erreur.

La couche 2 comporte également les règles nécessaires au partage d'un même support physique entre plusieurs stations, par exemple lorsque la distance entre les utilisateurs est faible. La vitesse du signal électrique étant de 200 m/µs, si un utilisateur demande 20 µs pour envoyer son bloc d'information et que le réseau ait une longueur de quelques centaines de mètres, il doit être seul à transmettre, faute de quoi une collision des signaux se produit. Une telle discipline d'accès est nécessaire dans les réseaux partagés, mais aussi dans les réseaux locaux et certains réseaux métropolitains.

Beaucoup de normes et de recommandations concernent la couche 2, dite aussi niveau liaison. Provenant de l'ISO, la norme HDLC (High-level Data Link Control) a été la première vraie norme à codifier les procédures de communication entre ordinateurs. Nous la détaillons à l'annexe F.

L'ISO a mis au point un ensemble de normes additionnelles de niveau trame concernant les réseaux locaux, les méthodes d'accès et les protocoles de liaison. Tous ces mécanismes effectués au niveau trame sont détaillés au chapitre 14.

La couche 3 (réseau), ou niveau paquet

La couche 3, ou niveau paquet, est appelée couche réseau dans le modèle de référence parce que l'échange de paquets de bout en bout donne naissance à un réseau. Le niveau paquet doit permettre d'acheminer correctement les paquets d'information jusqu'à l'utilisateur final. Pour aller de l'émetteur au récepteur, il faut passer par des nœuds de transfert intermédiaires ou par des passerelles, qui interconnectent deux ou plusieurs réseaux.

Un paquet n'est pas une entité transportable sur une ligne physique, car si l'on émet les bits directement sur le support, il n'est pas possible de détecter la limite entre deux paquets arrivant au récepteur. Il y a donc obligation d'encapsuler les paquets dans des trames pour permettre leur transport d'un nœud vers un autre nœud.

Le niveau paquet nécessite trois fonctionnalités principales : le contrôle de flux, le transfert (routage ou commutation) et l'adressage :

- **Contrôle de flux.** Évite les embouteillages de paquets dans le réseau. Les retards provenant des surcharges de certaines parties du réseau peuvent en effet rendre le temps de réponse inacceptable pour l'utilisateur. Si le contrôle de flux échoue, un contrôle de congestion fait normalement revenir le trafic à une valeur acceptable par le réseau.
- **Routage et commutation.** Permettent d'acheminer les paquets d'information vers leur destination au travers du maillage des nœuds de transfert. Dans la commutation les paquets suivent toujours le même chemin, alors que, dans le routage, la route peut changer. Le routage, ou la commutation, ne remplace pas le contrôle de flux mais peut être vu comme une de ses composantes, dont il faut tenir compte pour optimiser le temps de réponse. Les techniques de routage ou de commutation peuvent être centralisées ou distribuées, suivant l'option choisie par le gestionnaire du réseau : soit les tables de routage ou de commutation sont conçues par un nœud central, soit elles sont créées par chaque nœud, avec les problèmes de cohérence que cela pose.
- **Adressage.** La dernière grande fonction de la couche réseau consiste à gérer les adresses des équipements terminaux. Pour cela, il faut ajouter des adresses complètes

dans les différents paquets, pour ce qui concerne le routage, ou dans le paquet de signalisation qui ouvre le chemin, pour la commutation. Les adresses forment un vaste ensemble, qui doit regrouper toutes les machines terminales du monde. L'ISO a dû prévoir une norme d'adressage susceptible de répertorier l'ensemble des équipements terminaux. Dans le monde TCP/IP, un adressage par réseau a été choisi.

Pour mettre en place et développer les fonctionnalités de la couche réseau, il est possible de choisir entre deux grandes méthodes d'accès :

- Le mode avec connexion, dans lequel l'émetteur et le récepteur se mettent d'accord sur un comportement commun et négocient les paramètres et les valeurs à mettre en œuvre.
- Le mode sans connexion, qui n'impose pas de contrainte à l'émetteur par rapport au récepteur.

Le mode avec connexion concerne les techniques de commutation dans lesquels un chemin doit être mis en place. Avec l'aide de la signalisation, la connexion est mise en place avant que débute le transfert des trames. Les modes ATM et MPLS font partie de cette catégorie. Le protocole IP travaille en mode sans connexion : le transfert des paquets démarre immédiatement sans que les deux extrémités se mettent d'accord sur les caractéristiques de la communication.

La couche 4 (transport), ou niveau message

Le niveau message prend en charge le transport du message de l'utilisateur d'une extrémité à une autre du réseau. Ce niveau est aussi appelé couche transport pour bien indiquer qu'il s'agit de transporter les données de l'utilisateur. Il représente le quatrième niveau de l'architecture, d'où son autre nom de couche 4.

Le service de transport doit optimiser l'utilisation des infrastructures sous-jacentes en vue d'un bon rapport qualité/prix. La couche 4 optimise les ressources du réseau de communication en gérant un contrôle de flux ou un multiplexage des messages de niveau message sur une connexion réseau. Cette couche de transport est l'ultime niveau qui s'occupe de l'acheminement de l'information. Elle permet de compléter le travail accompli par les couches précédentes. C'est grâce à elle que l'utilisateur obtient la qualité de service susceptible de le satisfaire. Le protocole de niveau message à mettre en œuvre à ce niveau dépend du service rendu par les trois premières couches et de la demande de l'utilisateur.

La couche 4 aujourd'hui la plus utilisée provient de l'architecture du monde Internet et plus exactement de la norme TCP (Transmission Control Protocol). Comme nous le verrons, une autre norme, UDP (User Datagram Protocol), peut aussi être utilisée. Nous examinons ces normes en détail au chapitre 8.

La couche 5 (session), ou niveau connexion

Le rôle de la couche session est de fournir aux entités de présentation les moyens nécessaires à l'organisation et à la synchronisation de leur dialogue. À cet effet, la couche 5 fournit les services permettant l'établissement d'une connexion, son maintien et sa

libération, ainsi que ceux permettant de contrôler les interactions entre les entités de présentation.

Ce niveau est aussi le premier de l'architecture réseau à se situer hors de la communication proprement dite. Comme son nom l'indique, la couche session a pour fonction d'ouvrir et de fermer des sessions entre utilisateurs. Il est inutile d'émettre de l'information s'il n'y a personne à l'autre extrémité pour récupérer ce qui a été envoyé. Il faut donc s'assurer que l'utilisateur que l'on veut atteindre, ou du moins son représentant, qui peut être une boîte aux lettres électronique, par exemple, est présent.

La couche 5 comporte des fonctionnalités rendant possibles l'ouverture, la fermeture et le maintien de la connexion. Les mises en correspondance des connexions de session et des connexions de transport sont effectuées une à une.

De nombreuses autres possibilités peuvent être ajoutées aux commandes de base, appelées primitives, indispensables à la mise en place de la session. La pose de points de resynchronisation, par exemple, est recommandée. Ils permettent, en cas de problème, de disposer d'un point précis, sur lequel il y a accord entre les deux parties communicantes, à partir duquel l'échange peut redémarrer. La gestion des interruptions et des reprises de session est également une fonctionnalité souvent implémentée.

Pour ouvrir une connexion avec une machine distante, la couche session doit posséder un langage qui soit intelligible par l'autre extrémité. C'est pourquoi, avant d'ouvrir une connexion, il est obligatoire de passer par le niveau présentation, qui garantit l'unicité du langage, et le niveau application, qui permet de travailler sur des paramètres définis d'une façon homogène.

La normalisation du niveau session comprend les normes suivantes :

- ISO 8326, ou CCITT X.215, qui définit le service orienté connexion devant être rendu par la couche session. Un additif propose un service sans connexion.
- ISO 8327, ou CCITT X.225, qui spécifie le protocole de session orienté connexion.
- ISO 9548, qui définit un protocole de session en mode sans connexion.

La couche 6 (présentation), ou niveau syntaxe

La couche présentation se charge de la syntaxe des informations que les entités d'application se communiquent. Deux aspects complémentaires sont définis dans la norme :

- La représentation des données transférées entre entités d'application.
- La représentation de la structure de données à laquelle les entités se réfèrent au cours de leur communication et la représentation de l'ensemble des actions effectuées sur cette structure de données.

En d'autres termes, la couche présentation s'intéresse à la syntaxe tandis que la couche application se charge de la sémantique. La couche présentation joue un rôle important dans un environnement hétérogène. C'est un intermédiaire indispensable pour une compréhension commune de la syntaxe des documents transportés sur le réseau. Les différentes machines connectées n'ayant pas la même syntaxe pour exprimer les applications qui s'y effectuent, si on les interconnecte directement, les données de l'une ne

peuvent généralement pas être comprises de l'autre. La couche 6 procure un langage syntaxique commun à l'ensemble des utilisateurs connectés.

Si Z est le langage commun, et si une machine X veut parler à une machine Y, elles utilisent des traducteurs X-Z et Y-Z pour discuter entre elles. C'est notamment le cas lorsque les machines X et Y ne suivent pas la norme. Si toutes les machines terminales possèdent en natif un langage syntaxique commun, les traductions deviennent inutiles.

La syntaxe abstraite ASN.1 (Abstract Syntax Notation 1) normalisée par l'ISO est le langage de base de la couche présentation. Fondée sur la syntaxe X.409 du CCITT (Consultative Committee for International Telegraph and Telephone), ASN.1 est une syntaxe suffisamment complexe pour prendre facilement en compte les grandes classes d'applications, comme la messagerie électronique, le transfert de fichiers, le transactionnel, etc.

La normalisation de la couche présentation comprend les normes suivantes :

- ISO 8824, ou CCITT X.208, qui définit la syntaxe ASN.1.
- CCITT X.216 et X.226, qui définissent le service et le protocole de la couche session.

La couche 7 (application), ou niveau sémantique

La couche application est la dernière du modèle de référence. Elle fournit aux processus applicatifs le moyen d'accéder à l'environnement réseau. Ces processus échangent leurs informations de type sémantique par l'intermédiaire des entités d'application.

De très nombreuses normes ont été définies pour cette couche. En ce qui concerne la définition de la couche même, c'est la norme ISO 9545, ou CCITT X.207, qui décrit sa structure.

La couche application contient toutes les fonctions impliquant des communications entre systèmes, en particulier si elles ne sont pas réalisées par les niveaux inférieurs. Il s'occupe essentiellement de la sémantique, contrairement à la couche présentation, qui prend en charge la syntaxe.

L'architecture TCP/IP

Dans les années 1970, le département de la Défense américain, ou DOD (Department Of Defense), décide, devant le foisonnement de machines utilisant des protocoles de communication différents et incompatibles, de définir sa propre architecture. Cette architecture, dite TCP/IP, est à la source du réseau Internet. Elle est aussi adoptée par de nombreux réseaux privés, appelés intranets.

Les deux principaux protocoles définis dans cette architecture sont les suivants :

- IP (Internet Protocol), de niveau réseau, qui assure un service sans connexion.
- TCP (Transmission Control Protocol), de niveau transport, qui fournit un service fiable avec connexion.

TCP/IP définit une architecture en couches qui inclut également, sans qu'elle soit définie explicitement, une interface d'accès au réseau. En effet, de nombreux sous-réseaux

distincts peuvent être pris en compte dans l'architecture TCP/IP, de type aussi bien local qu'étendu.

Cette architecture est illustrée à la figure 2.2. Il faut noter dans cette figure l'apparition d'un autre protocole de niveau message (couche 4), UDP (User Datagram Protocol). Ce protocole utilise un mode sans connexion, qui permet d'envoyer des messages sans l'autorisation du destinataire.

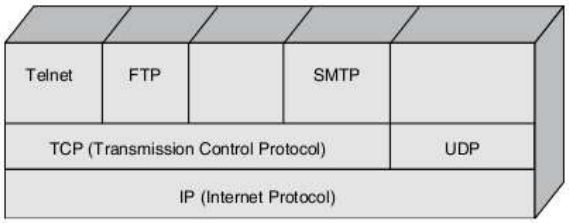

Figure 2.2

Architecture TCP/IP

Cette architecture a pour socle le protocole IP, qui correspond au niveau paquet (couche 3) de l'architecture du modèle de référence. En réalité, il ne correspond que partiellement à ce niveau. Le protocole IP a été conçu comme protocole d'interconnexion, définissant un bloc de données d'un format bien défini et contenant une adresse, mais sans autre fonctionnalité. Son rôle était de transporter ce bloc de données dans un paquet selon n'importe quelle autre technique de transfert de paquets. Cela vaut pour la première génération du protocole IP, appelée IPv4, qui est encore massivement utilisée aujourd'hui. La deuxième version du protocole IP, IPv6, joue réellement un rôle de niveau paquet, avec de nouvelles fonctionnalités permettant de transporter les paquets d'une extrémité du réseau à une autre avec une certaine sécurité.

Les paquets IP sont indépendants les uns des autres et sont routés individuellement dans le réseau par le biais de routeurs. La qualité de service proposée par le protocole IP est très faible, sans détection de paquets perdus ni de possibilité de reprise sur erreur.

Le protocole TCP regroupe les fonctionnalités de niveau message (couche 4) du modèle de référence. C'est un protocole assez complexe, qui comporte de nombreuses options permettant de résoudre tous les problèmes de perte de paquet dans les niveaux inférieurs. En particulier, un fragment perdu peut être récupéré par retransmission sur le flot d'octets. Le protocole TCP est en mode avec connexion, contrairement à UDP. Ce dernier protocole UDP se positionne aussi au niveau transport mais dans un mode sans connexion et n'offre pratiquement aucune fonctionnalité. Il ne peut prendre en compte que des applications qui demandent peu de service de la part de la couche transport.

Les protocoles situés au-dessus de TCP et d'UDP sont de type applicatif et proviennent en grande partie du monde UNIX.

Toute la puissance de cette architecture repose sur la souplesse de sa mise en œuvre au-dessus de n'importe quel réseau existant. Soi, par exemple, X et Y, respectivement un réseau local et un réseau étendu à commutation de cellules ou de paquets. Le protocole IP est implémenté sur toutes les machines connectées à ces deux réseaux. Pour qu'il soit possible de passer d'un réseau à l'autre, un routeur, dont le rôle est de décapsuler le paquet arrivant du réseau X et de récupérer le paquet IP, est mis en place. Après traitement, essentiellement du routage, le paquet IP est encapsulé dans le paquet du réseau Y. Le rôle du routeur est, comme son nom l'indique, de router le paquet vers la bonne destination.

L'architecture d'interconnexion du réseau Internet est illustrée à la figure 2.3.

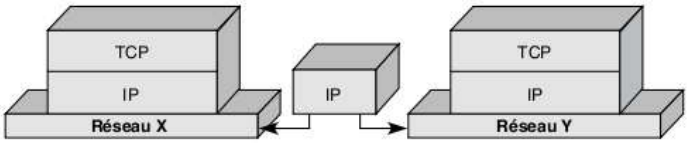

Figure 2.3

Architecture d'interconnexion du réseau Internet

La souplesse de cette architecture peut parfois être un défaut, dans le sens où l'optimisation globale du réseau est effectuée sous-réseau par sous-réseau, c'est-à-dire qu'elle est obtenue par une succession d'optimisations locales.

Une particularité importante de l'architecture TCP/IP est que l'intelligence et le contrôle du réseau se trouvent en presque totalité dans la machine terminale et non pas dans le réseau. C'est le protocole TCP qui se charge d'envoyer plus ou moins de paquets dans le réseau en fonction de l'occupation de celui-ci. L'intelligence de contrôle se trouve dans le PC extrémité, et plus précisément dans le logiciel TCP. La fenêtre de contrôle de TCP augmente ou diminue le trafic suivant la vitesse requise pour faire un aller-retour. Le coût de l'infrastructure est extrêmement bas puisque nombre de logiciels, et donc l'essentiel de l'intelligence, se trouvent dans les machines terminales. Le service rendu par ce réseau de réseaux est de type best-effort, ce qui signifie que le réseau fait de son mieux pour écouler le trafic.

Le protocole IPv6 apporte une nouvelle dimension, puisqu'il introduit des fonctionnalités inédites qui rendent les nœuds du réseau plus intelligents. Les routeurs de nouvelle génération possèdent des algorithmes de gestion de la qualité de service en vue d'assurer un transport capable de satisfaire à des contraintes temporelles ou de perte de paquets. Cependant, le protocole IPv4 a bien réagi aux nouveautés apportées par IPv6, en modifiant certains champs pour proposer les mêmes améliorations.

Dans la version classique d'IPv4, chaque nouveau client n'est pas traité différemment de ceux qui sont déjà connectés, et les ressources sont distribuées équitablement entre tous les utilisateurs. Les politiques d'allocation de ressources des opérateurs de télécommunications sont totalement différentes, un client possédant déjà une certaine qualité de

service ne devant pas être pénalisé par l'arrivée d'un nouveau client. Comme nous le verrons, la solution aujourd'hui préconisée dans l'environnement Internet est de favoriser, dans la mesure du possible, les clients ayant des exigences de temps réel, et ce par des protocoles adaptés.

Les applications disponibles au-dessus de l'environnement TCP/IP sont nombreuses et variées. Elles incluent la messagerie électronique (SMTP), le transfert de fichiers (FTP), les bases de données distribuées avec le World-Wide Web (WWW) et bien d'autres.

Les architectures de niveau 1 (élément binaire)

Les architectures de niveau 1 se présentent comme illustré à la figure 2.4.

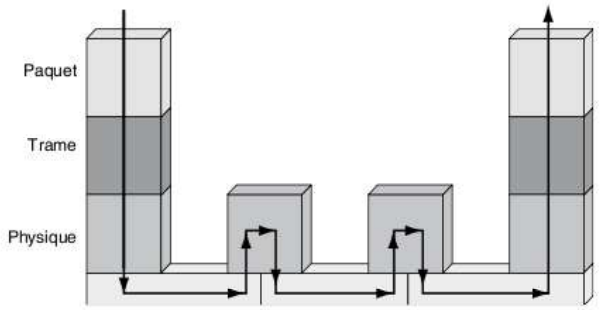

Figure 2.4

Architecture de niveau 1

Le paquet, que nous supposons toujours de type IP dans la suite du chapitre, puisque cela représente presque 100 % des cas, est encapsulé dans une trame, laquelle est émise sur le support physique. Les nœuds intermédiaires ne s'occupent que de modifier le type de support physique, sans remonter au niveau de la trame. C'est la même trame que l'on retrouve à l'autre extrémité du réseau en décapsulant le paquet.

Les réseaux de niveau physique sont évidemment les plus rapides, puisqu'il n'y a pas à récupérer la trame ou le paquet dans les nœuds intermédiaires.

Les architectures de niveau 2 (trame)

Une trame peut être définie comme une suite d'éléments binaires qui possède en elle-même un moyen de reconnaissance du début et de la fin du bloc transporté. Par exemple, la norme de niveau 2 Ethernet comporte une suite parfaitement définie permettant la reconnaissance du début et de la fin de la trame. De même, la trame ATM comporte un moyen physique de reconnaissance du début et de la fin. Le protocole PPP (Point-to-Point Protocol) commence et termine par la zone 01111110 qui détermine les débuts et fins. On

donne à ces trois exemples le nom de transfert de niveau trame, ou de niveau 2. Ethernet et ATM sont des commutations tandis que PPP est un transfert de niveau 2 entre deux machines.

Une architecture de niveau 2 se présente sous la forme illustrée à la figure 2.5.

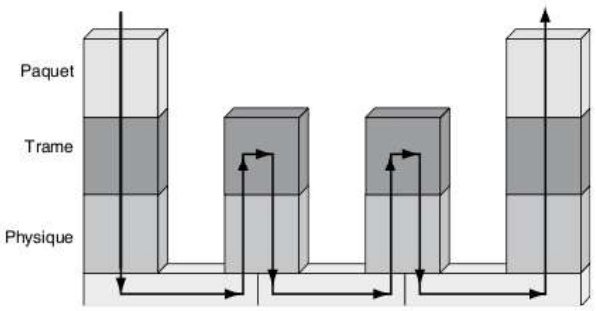

Figure 2.5

Architecture de niveau 2

Dans cette architecture, on met le paquet IP dans une trame. Les nœuds de transfert intermédiaires rassemblent les bits pour récupérer la trame. Les adresses, ou références, se trouvent dans la trame de façon que le nœud puisse les router ou les commuter. En général, il s'agit d'une commutation Ethernet ou ATM. On regroupe les label-switching dans cet ensemble et l'on verra avec MPLS (MultiProtocol Label-Switching) une généralisation de la commutation de niveau 2.

Il est possible de trouver une commutation de niveau 2 hétérogène, indiquant que la structure de la trame dans un nœud intermédiaire peut être modifiée. Par exemple, une trame ATM peut-être remplacée par une trame Ethernet. Cela indique que le commutateur décapsule la trame pour récupérer le paquet mais qu'il ne s'en sert pas. Il le réencapsule immédiatement dans une nouvelle trame. Nous trouvons ce genre de technique dans MPLS également.

Les architectures de niveau 3 (paquet)

Une architecture de niveau 3 demande que le niveau de l'entité examinée par le nœud soit un paquet. C'est la solution préconisée par Internet. À chaque nœud, on regroupe les bits pour reformer la trame, puis on décapsule la trame pour retrouver le paquet. On examine ensuite les zones du paquet pour retrouver les zones de contrôle contenant les informations de routage.

Une fois la porte de sortie déterminée, il faut de nouveau encapsuler le paquet dans une trame puis envoyer les éléments binaires sur le support physique. C'est une architecture

assez lourde, puisqu'il faut faire beaucoup de travail pour remonter jusqu'au niveau paquet. On comprend qu'elle ait pu être adoptée par Internet, dont le but était d'avoir une structure de données unique, comprise de tous les PC. Cette structure unique est encapsulée dans des trames, qui peuvent être différentes à chaque liaison.

Une architecture de niveau 3 se présente sous la forme illustrée à la figure 2.6.

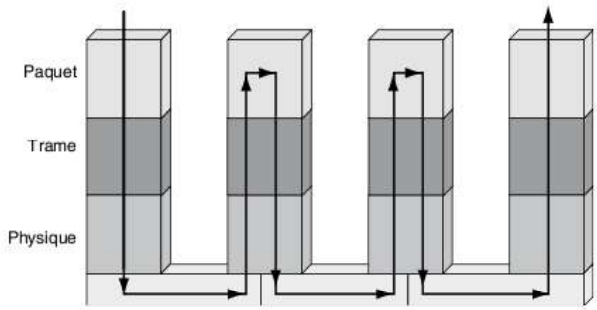

Figure 2.6

Architecture de niveau 3

Les architectures hybrides

Il est envisageable d'avoir des structures hybrides de deux types :

- Chaque nœud de transfert possède un niveau 2 ou un niveau 3.
- Chaque nœud possède à la fois les niveaux 2 et 3.

Dans le premier cas, certains nœuds commutent la trame de niveau 2, mais d'autres nœuds remontent jusqu'au niveau 3 pour aller rechercher l'adresse IP et router sur l'adresse IP du destinataire. Dans le second cas, le nœud reçoit une trame et recherche s'il peut trouver une référence pour commuter, sinon il décapsule la trame pour retrouver le paquet IP et le router. Les nœuds sont alors des routeurs-commutateurs, que l'on trouve dans certains réseaux d'entreprise parce qu'ils permettent d'optimiser le mode de fonctionnement du réseau en fonction des critères des flots. Pour un flot constitué d'un seul paquet, il est plus simple de router. En revanche, dès que le flot est long, il est plus performant de commuter les paquets de l'utilisateur.

Les architectures « crosslayer »

L'architecture en couches a pour avantage de simplifier la compréhension des architectures. Elle permet en outre de déterminer où se trouvent certaines fonctionnalités. Cependant, cette solution ne permet pas de contrôler le réseau de façon optimale.

Prenons comme exemple le contrôle d'un flot de paquets provenant d'une application de vidéo. Les algorithmes de contrôle ont intérêt à connaître l'application définie dans le niveau 7 qui est en train d'être véhiculée pour savoir si une perte de paquet est importante ou non, si le taux d'erreur du niveau 2 est acceptable ou non, si le support physique permet de redémarrer sur une coupure d'une liaison, etc. En fait, un protocole de contrôle a souvent besoin de connaître des éléments se trouvant dans les différentes couches.

Les architectures *crosslayer* ont pour objectif de rassembler toutes les couches en une seule afin que des algorithmes puissent rechercher les bonnes informations directement au bon endroit.

De nombreuses architectures ont été proposées, mais il semble que l'on s'oriente vers des architectures dites autonomiques (*autonomic*) pour gérer le *crosslayer*. Dans ces architectures, les nœuds sont à la fois autonomes et capables de réagir instantanément. La fonction *crosslayer* est réalisée au travers d'un plan de connaissance qui rassemble les informations nécessaires de tous les niveaux. L'architecture en couches est conservée, mais les connaissances nécessaires au *crosslayer* sont mises en commun dans une couche particulière.

Les techniques de transfert

Il existe de nombreuses techniques de transfert (*forwarding* en anglais), notamment la commutation de circuits, le transfert de messages, le routage de paquets, la commutation de trames et la commutation de cellules. Les deux grandes techniques qui dominent le marché sont le routage de paquets et la commutation de trames. Une autre solution qui se fait jour sur le marché est le routage de trames, que nous verrons en détail au chapitre 17 consacré aux réseaux SDN. La commutation de paquets, qui était la solution adoptée par le standard X.25, a disparu. Dans le routage de trames, il faut une adresse complète dans la trame, et dans la commutation de paquets, une référence dans le paquet (ce qui était le cas de la norme X.25, que nous décrivons en détail à l'annexe F).

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 le routage de paquets sont venus ensuite pour optimiser l'utilisation des lignes de communication dans les environnements informatiques. Enfin, la commutation de trames et la commutation de cellules, ont été mises au point pour augmenter les débits sur les lignes. Nous allons introduire ces différentes solutions avant de les détailler aux chapitres 13 à 17.

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 2.7 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 3*).

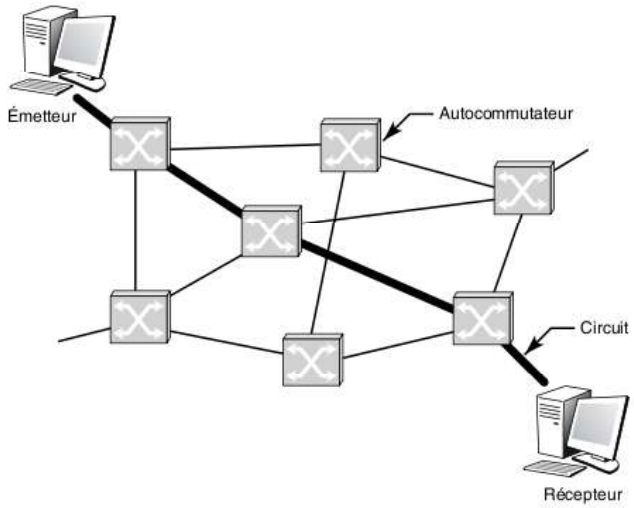

Figure 2.7

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.

La commutation de circuits n'a pas disparu, mais son usage diminue d'environ 6 % chaque année dans le monde. Elle pourrait ne plus exister vers 2020.

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 2.8. 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 2.9.

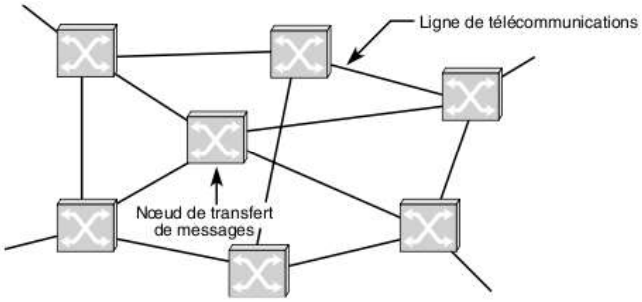

Figure 2.8

Réseau à transfert de messages

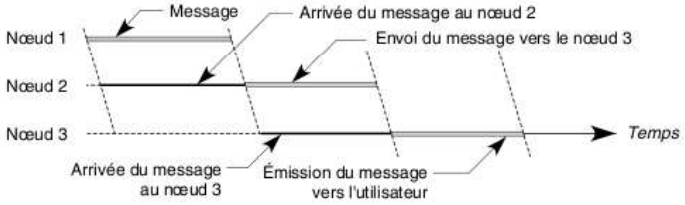

Figure 2.9

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 ont été remplacées par des techniques de transfert de paquets.

Le routage de paquets

Nous introduisons ici le routage de paquets plutôt que le transfert de paquets, qui est plus général et contient à la fois le routage et la commutation de paquets. Historiquement, c'est le routage de paquets qui est apparu en premier et qui est devenu le standard d'Internet avec le routage des paquets IP. La commutation de paquets a connu un grand succès entre 1980 et 2000 avec le standard X.25, mais cette solution a aujourd'hui disparu.

Pour accélérer la vitesse de transmission et simplifier les reprises sur erreur, on a vu apparaître, au début des années 1970, le concept de réseau à routage 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 1 500 octets. Le découpage en paquets des messages des utilisateurs facilite grandement les retransmissions.

La figure 2.10 illustre le comportement dans le temps d'un réseau à transfert de messages comparé à celui d'un réseau à routage de paquets. On constate que le temps de traversée, ou de transit, du réseau à routage 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.

Dans le routage 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 2.11.

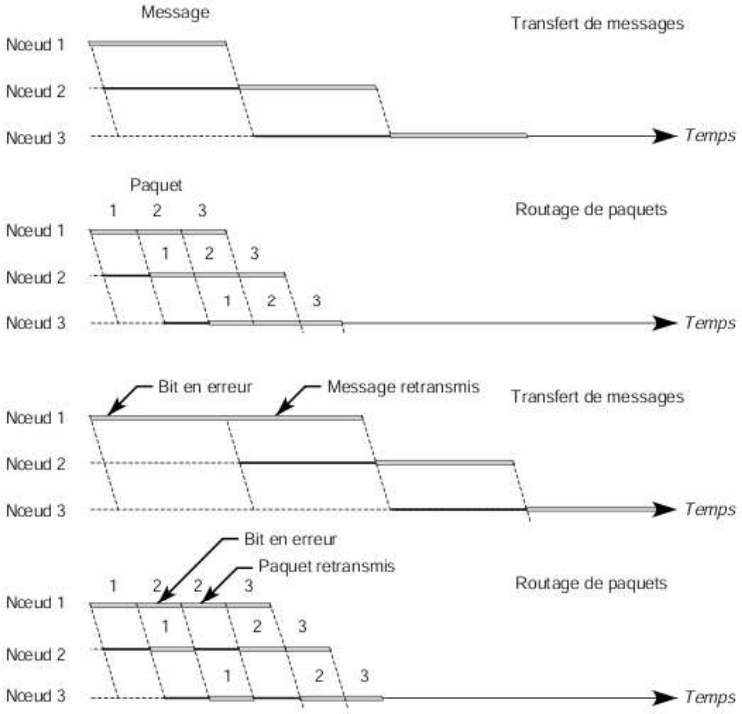

Figure 2.10

Temps de réponse comparés du routage de paquets et du transfert de messages

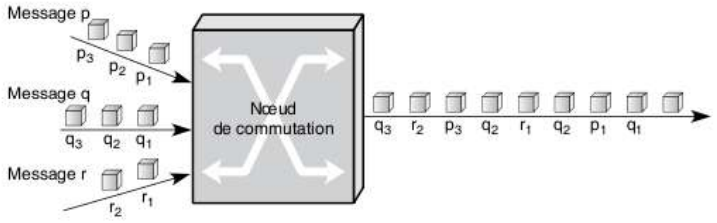

Figure 2.11

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. À la figure 2.11, 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, 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.

La commutation de trames

Comme pour le paquet, deux types de transferts de trames sont possibles : la commutation de trames et le routage de trames. Pour avoir un routage de trames, il faut une adresse complète du destinataire dans la trame. Cette solution n'existant pas, nous nous focaliserons, après une introduction générale sur le transfert de trames, sur la commutation 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 4.

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 à son tour le paquet 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 ont été jusqu'à très récemment représentés uniquement par la commutation. Les deux principales commutations sont l'ATM 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 dans une section ultérieure.

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 1970 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 6, dévolu au niveau trame, 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 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. Elles sont à la base de la technique MPLS.

Le routage de trames

Le routage de trames est une solution totalement nouvelle qui a été lancée en 2012 pour pallier les limitations de la capacité de transfert du routage de paquets. En effet, avec le routage de paquets, il faut encapsuler et décapsuler pour remonter au niveau paquet. Si l'on peut éviter de remonter au niveau 3, les capacités de transfert augmentent automatiquement. La difficulté provient de l'adresse à utiliser au niveau 2. En effet, la seule adresse facilement exploitable est l'adresse IP qui se trouve au niveau 3 dans le paquet.

La première génération, si l'on peut parler ainsi, utilisait l'adresse Ethernet, le routage s'effectuant au moyen d'un algorithme appelé STP (Spanning Tree Protocol). Ce protocole, que nous détaillons au chapitre dédié à la couche trame, permet de déterminer un arbre à travers tous les nœuds du réseau. Pour aller d'un terminal à un autre, il suffit de descendre d'une feuille de l'arbre vers le tronc puis de remonter vers une autre feuille, ce qui entraîne un chemin unique. Malheureusement, cet algorithme fortement utilisé dans la commutation Ethernet n'est pas optimal et se révèle complexe à mettre en œuvre.

La nouvelle génération du routage de trames utilise un véritable algorithme de routage, le routage IS-IS, qui a été descendu du niveau 3 au niveau 2, ainsi qu'une association astucieuse entre l'adresse Ethernet et l'adresse IP. Cette solution permet en outre le multichemin, c'est-à-dire la possibilité pour les trames de s'écouler par plusieurs chemins simultanément afin d'augmenter la capacité de transmission entre l'émetteur et le récepteur.

La commutation de trames ATM

La commutation de trames ATM est une commutation de trames très particulière, dans laquelle toutes les trames ont une longueur fixe de 53 octets. On appelle parfois cette technique de transfert la commutation de cellules. Quelle que soit la taille des données à

transporter, la trame occupe toujours 53 octets. Si les données forment un bloc de plus de 53 octets, un découpage est effectué, et la dernière trame n'est pas complètement remplie. La trame ATM est illustrée à la figure 2.12.

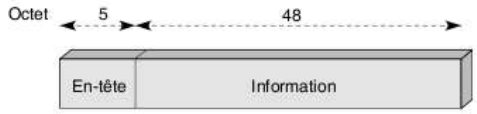

Figure 2.12

La trame ATM

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

La commutation de trames ATM 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 trame, 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 trames ATM est une technique de transfert qui a pris un essor considérable à la fin des années 1980 grâce à sa simplicité, qui permet de monter facilement en débit. Malheureusement, elle n'a jamais pu s'imposer à l'interface utilisateur, et c'est la commutation Ethernet qui a largement pris le dessus.

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 d'une dizaine de fois supérieur à celui d'un routeur. Cette différence a toutefois tendance à se réduire avec les routeurs gigabit, dits gigarouteurs capable de router plus de 100 000 paquets IP toutes les secondes.

La différence principale entre le routage et la commutation réside dans le type d'information de supervision transportée 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 la trame ou le paquet. La trame ou 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.

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.

En cas de cassure de ligne ou de panne d'un nœud, un nouveau chemin doit être déterminé par le système de signalisation, ce qui prend beaucoup de temps (plusieurs centaines de millisecondes). Le réacheminement est donc totalement à éviter mais indispensable sur des pannes. Pour éviter ce cas, il est possible d'ouvrir deux chemins menant de l'émetteur au récepteur dont un seul est utilisé et l'autre mis en secours. Dans ce cas, il faut plus de ressources dans le réseau, et le coût augmente en conséquence.

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 bonne vitesse. Lorsque la commutation ne s'effectue que sur une partie de la référence, le commutateur s'appelle un brasseur. Dans le monde de la commutation, le temps de traversée d'un nœud doit rester négligeable par rapport au temps de transit du réseau, pour que celui-ci soit à peu près égal au temps de propagation.

La commutation permet donc d'acheminer des informations au travers d'un réseau en les transportant de nœud en nœud suivant un chemin (*path*) prédéfini, longtemps appelé circuit virtuel. Ce chemin est défini par une succession de références que tous les paquets d'un même flot doivent suivre, comme s'ils étaient sur un circuit. Le 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 (*forwarding*) 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 2.13 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.

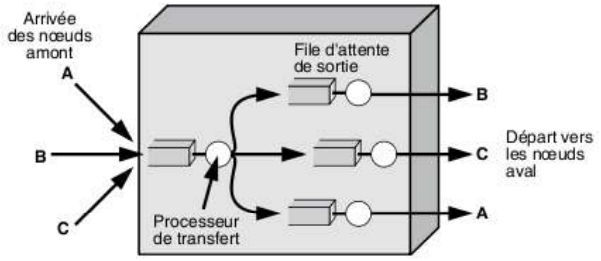

Figure 2.13

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'Ethernet commuté ou 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. 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 années 2010 apportent des fonctionnalités nouvelles, comme la multiplication des tables de transfert (routage ou commutation), qui permet d'obtenir une table par catégorie d'utilisateurs, voire une table par utilisateur. En d'autres termes, la table de transfert diffère en fonction des contraintes de l'utilisateur. Si certains paquets doivent être remis au plus tôt, d'autres disposent de plus de temps pour effectuer la traversée du réseau et passent par des chemins ou des routes plus longues afin de libérer les liens sensibles du réseau. Cette solution intéressante demande d'importantes capacités de calcul et de récupération des informations des clients. C'est l'arrivée du Cloud et la centralisation des calculs qui ont permis ces avancées. Nous verrons cela plus en détail au chapitre 17, consacré aux réseaux SDN et OpenFlow.

Les nœuds peuvent aussi être dotés de filtres applicatifs capables d'identifier l'ensemble des applications transportées par analyse syntaxique des paquets. De nouveau, en fonction de l'application concernée, différentes fonctionnalités peuvent être mises en œuvre, comme la destruction, l'accélération, le ralentissement ou la compression des paquets.

Les commutateurs

En anglais, les commutateurs sont appelés « *label switches* » ou, plus fréquemment, *switches*, pour bien insister sur le fait que les commutateurs utilisent des références (*labels*).

L'un des atouts majeurs des systèmes de commutation réside dans l'architecture des commutateurs. Plusieurs types d'architectures 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 des lignes de transmission, les commutateurs doivent pouvoir commuter les paquets à des débits extrêmement élevés tout en étant capables de traiter plusieurs milliers de chemins 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.

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.

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 2.14 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 ».

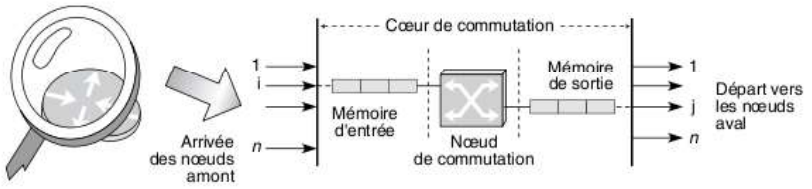

Figure 2.14

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 commutateurs-routeurs ou LSR (Label Switch Router)

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 essayer d'optimiser l'acheminement des paquets en proposant des solutions mixtes, appelées commutateurs-routeurs, superposant dans une même boîte un commutateur et un routeur.

Grâce à leur architecture double, les commutateurs-routeurs 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 chemin, 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.

Malgré l'intérêt de ces commutateurs-routeurs, comme il n'a jamais été possible de déterminer facilement la méthode la plus intéressante en fonction de l'application, les évolutions ont poussé à l'adoption de ces commutateurs-routeurs dans un cas simple : on route la signalisation et on commute les données de l'utilisateur.

La commutation a toujours demandé un routage de la signalisation, mais comme le système de signalisation était spécifique dans les anciennes techniques comme X.25 et ATM, on n'utilisait pas le mot routage. Aujourd'hui, dans la technique de base des opérateurs, appelée MPLS, le réseau de signalisation est un réseau IP et on utilise le mot routage pour indiquer l'ouverture du chemin. Une fois le chemin ouvert, on commute tous les paquets de données, encapsulés dans des trames, sur le chemin. Les Anglo-Saxons utilisent le terme « Label Switch Router » (LSR) pour indiquer qu'il y a un commutateur (*label switch*) et un routeur dans chaque nœud du réseau.

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 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, comme MPLS, forment un bon compromis, malgré leur prix de revient assez élevé puisque deux technologies se superposent.

3

Le médium de transport

Le médium de transport correspond aux éléments matériels et immatériels capables de transporter des éléments binaires, comme les câbles et les ondes radio. Dans le premier cas, ce sont des fils métalliques ou des fibres optiques qui transportent l'information ; dans le second, ce sont les ondes hertziennes.

Les deux types de support sont plus complémentaires que concurrents. Le hertzien permet la mobilité, avec des débits qui deviennent très importants, surtout avec la 4G et la nouvelle génération de Wi-Fi Sur les câbles optiques, on arrive aujourd'hui à des centaines de gigabits par seconde contre des centaines de mégabits par seconde pour le hertzien.

Ce chapitre examine les caractéristiques de ces différents médias de transport afin de mieux faire comprendre les architectures que l'on peut bâtir au-dessus.

Le médium physique

Par médium physique, il faut entendre tous les composants physiques permettant de transmettre les éléments binaires, suites de 0 et de 1, représentant les données à transmettre.

La nature des applications véhiculées par le réseau peut influer sur le choix du support, certaines applications nécessitant, par exemple, une bande passante importante et, par là même, l'adoption de la fibre optique. Le câble coaxial permet lui aussi de transférer des débits binaires importants, même si ces derniers restent inférieurs à ceux offerts par la fibre optique.

Aujourd'hui, les progrès technologiques rendent l'utilisation de la paire de fils torsadée bien adaptée à des débits de 10 à 100 Mbit/s, voire 1 Gbit/s sur des distances plus courtes. Sa facilité d'installation par rapport au câble coaxial et son prix très inférieur la rendent à la fois plus attractive et plus compétitive.

La fibre optique est présente dans tous les systèmes de câblage proposés par les constructeurs, en particulier sur les liaisons entre locaux techniques. Elle présente l'avantage d'un faible encombrement, l'espace très important requis par les autres supports physiques pouvant devenir contraignant. Un autre avantage de la fibre optique est son immunité au bruit et aux interférences électromagnétiques. Dans certains environnements perturbés les erreurs de transmission peuvent en effet devenir inacceptables. De même, sa protection naturelle contre l'écoute la rend attrayante dans les secteurs où la confidentialité est importante, comme l'armée ou la banque.

On observe une utilisation de plus en plus fréquente de la paire torsadée. Les progrès technologiques lui ont permis de repousser ses limites théoriques par l'ajout de circuits électroniques et d'atteindre des débits importants à des prix nettement inférieurs à ceux du câble coaxial. La paire torsadée est de surcroît plus simple à installer que le câble coaxial, d'autant qu'elle peut utiliser l'infrastructure mise en place depuis longtemps pour le câblage téléphonique. La paire torsadée permet enfin de reconfigurer, de maintenir ou de faire évoluer le réseau de façon simple.

La paire de fils torsadée

La paire de fils torsadée est le support de transmission le plus simple. Comme l'illustre la figure 3.1, elle est constituée d'une ou de plusieurs paires de fils électriques agencés en spirale. Ce type de support convient à la transmission aussi bien analogique que numérique.

Les paires torsadées peuvent être blindées, une gaine métallique enveloppant complètement les paires métalliques, ou non blindées. Elles peuvent être également « écrantées ». Dans ce cas, un ruban métallique entoure les fils.

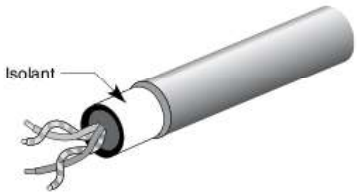

Figure 3.1

Paires de fils torsadées

De très nombreux débats ont lieu sur les avantages et inconvénients du blindage de ces câbles. On peut dire, en simplifiant, qu'un câble blindé devrait être capable de mieux immuniser les signaux transportés. L'inconvénient du blindage est toutefois qu'il exige la mise à la terre de l'ensemble de l'équipement, depuis le support physique jusqu'au terminal. Il faut donc que toute la chaîne de connexion des terres soit correctement effectuée et maintenue. En d'autres termes, un réseau blindé doit être de très bonne qualité, faute

de quoi il risque de se comporter moins bien qu'un réseau sans blindage, beaucoup moins onéreux.

Le blindage peut être global à l'ensemble des paires torsadées et l'on parle alors d'écran ou individuellement pour chaque paire torsadée.

Les dénominations des types de câbles torsadés sont introduites dans la norme ISO/IEC 11801 qui évolue régulièrement avec des amendements. Elles sont indiquées à la figure 3.2.

ANCIENNE DENOMINATION	NOUVELLE DENOMINATION	BLINDAGE DU CABLE (ECRAN)	BLINDAGE DES PAIRES INDIVIDUELLES
UTP (Unshielded Twisted Pair) – paire torsade non blindée	U/UTP	Aucun	Non
STP (Shielded Twisted Pair) – paire torsadée blindée	U/FTP	Aucun	Oui
FTP (Foiled Twisted Pair) – paire torsadée écrantée	F/UTP	Écran	Non
SFTP (Shielded and Foiled Twisted Pair) – paire torsadée écrantée et blindée	F/FTP	Écran	Oui
S-FTP (Shielded and Foiled Twisted Pair) – paire torsadée écrantée et blindée	SF/UTP	Écran et tresse	Non
S-STP (Shielded and Shielded Twisted Pair) – paire torsadée superblindée	S/FTP	Tresse	Oui

TABLEAU 3.1 • Dénominations des câbles torsadées

Les fils métalliques sont particulièrement adaptés à la transmission d'informations sur de courtes distances. Si la longueur du fil est peu importante, de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, des débits de plusieurs mégabits par seconde peuvent être atteints sans taux d'erreur inacceptable. Sur des distances plus courtes, on peut obtenir sans difficulté des débits de plusieurs dizaines de mégabits par seconde. Sur des distances encore plus courtes, on atteint facilement quelques centaines de mégabits par seconde. Une distance de l'ordre de 100 m permet de faire passer le débit à plusieurs gigabits par seconde.

La normalisation dans le domaine des câbles est effectuée par le groupe ISO/IEC JTC1/SC25/WG3 au niveau international et par des organismes nationaux comme l'EIA/TIA (Electronic Industries Association/Telecommunications Industries Association), aux États-Unis.

Les principales catégories de câbles définies sont les suivantes :

- Catégorie 3 (pour une largeur de bande jusqu'à 16 MHz). Utilisée pour les réseaux Ethernet de base, cette catégorie est abandonnée au profit de la catégorie 5.
- Catégorie 5 (pour une largeur de bande jusqu'à 100 MHz). Utilisée pour les réseaux Ethernet à relativement haut débit : 100BaseTX et 1000BaseT.
- Catégorie 5e (Enhanced, pour une largeur de bande de 100 MHz, mais avec des caractéristiques techniques qui ont fortement évolué).

- Catégorie 6 (pour une largeur de bande jusqu'à 250 MHz).
- Catégorie 6_A (pour une largeur de bande jusqu'à 500 MHz). Utilisée pour le 10GBaseT sur une centaine de mètres.
- Catégorie 7 (pour une largeur de bande de 600 MHz).
- Catégorie 7_A (pour une largeur de bande jusqu'à 1 000 MHz). Utilisée pour les versions ultimes d'Ethernet à 10 Gbit/s et 100 Gbit/s.

Il est possible de comparer les paires torsadées en fonction de leur paradiaphonie, c'est-à-dire de la perte d'une partie de l'énergie du signal due à la proximité d'un autre circuit et de son affaiblissement.

Le câble coaxial

Un câble coaxial est constitué de deux conducteurs cylindriques de même axe, l'âme et la tresse, séparés par un isolant (*voir figure 3.2*). Ce dernier permet de limiter les perturbations dues au bruit externe. Si le bruit est important, un blindage peut être ajouté. Quoique ce support perde du terrain, notamment par rapport à la fibre optique, il reste encore très utilisé.

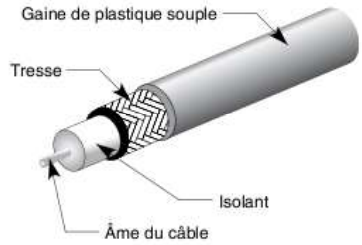

Figure 3.2

Coupe d'un câble coaxial

Les électroniciens ont démontré que le rapport des diamètres des deux conducteurs devait être de 3,6 mm. Les différents câbles utilisés sont désignés par le rapport en millimètre des diamètres de l'âme et de la tresse du câble, les deux plus courants étant les 2,6/9,5 et 1,2/4,4.

Comme pour les fils métalliques, le débit binaire obtenu sur un câble coaxial est inversement proportionnel à la distance à parcourir. Sur un câble coaxial de bonne qualité d'une longueur de 1 km, des débits supérieurs à 100 Mbit/s peuvent être atteints.

Les principales catégories de câbles coaxiaux disponibles sur le marché sont les suivantes :

- câble 50 Ω, de type Ethernet ;
- câble 75 Ω, de type CATV (câble de télévision).

La fibre optique

La fibre optique est utilisée dans les environnements où un très fort débit est demandé, mais également dans les environnements de mauvaise qualité. Elle comporte des composants extrémité qui émettent et reçoivent les signaux lumineux.

Les principaux composants émetteurs sont les suivants :

- Diode électroluminescente (DEL) dépourvue de cavité laser, qui émet des radiations lumineuses lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique.
- Diode laser (DL), qui émet un faisceau de rayonnement cohérent dans l'espace et dans le temps.
- Laser modulé.

L'utilisation d'un émetteur laser diminue le phénomène de dispersion, c'est-à-dire la déformation du signal provenant d'une vitesse de propagation légèrement différente suivant les fréquences. Cela donne une puissance optique supérieure aux DEL. La contrepartie de ces avantages est un coût plus important et une durée de vie du laser inférieure à celle d'une diode électroluminescente.

La figure 3.3 illustre une liaison par fibre optique. Cette figure comporte des codeurs et des décodeurs qui transforment les signaux électriques en signaux qui peuvent être émis sous forme de lumière dans la fibre optique et *vice versa*. L'émetteur est un des trois composants extrémité que nous venons de voir et le récepteur un photodétecteur capable de récupérer les signaux lumineux.

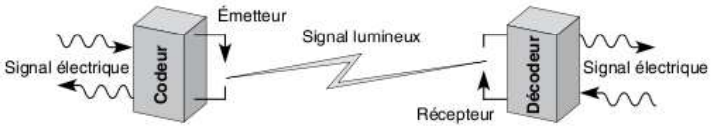

Figure 3.3

Liaison par fibre optique

Le faisceau lumineux est véhiculé à l'intérieur de la fibre optique, qui est un guide cylindrique d'un diamètre allant de quelques microns à quelques centaines de microns, recouvert d'isolant. La vitesse de propagation de la lumière dans la fibre optique est de l'ordre de 100 000 km/s en multimode et de 250 000 km/s en monomode.

Il existe plusieurs types de fibres, notamment les suivantes :

- Les fibres multimodes à saut d'indice, dont la bande passante peut atteindre 50 MHz sur 1 km.
- Les fibres multimodes à gradient d'indice, dont la bande passante peut atteindre 500 MHz sur 1 km.
- Les fibres monomodes, de très petit diamètre, qui offrent la plus grande capacité d'information potentielle, de l'ordre de 100 GHz/km, et les meilleurs débits. Ce sont aussi les plus complexes à réaliser.

On utilise généralement des câbles optiques contenant plusieurs fibres. L'isolant entourant les fibres évite les problèmes de diaphonie, c'est-à-dire de perturbation d'un signal par un signal voisin, entre les différentes fibres.

La capacité de transport de la fibre optique continue d'augmenter régulièrement grâce au multiplexage en longueur d'onde. Dans le même temps, le débit de chaque longueur d'onde ne cesse de progresser. On estime qu'il a été multiplié par deux tous les ans de 2000 à 2010, date à laquelle on a atteint près de 1 000 longueurs d'onde. Comme, sur une même longueur d'onde, la capacité est passée pour la même période de 2,5 à 40 Gbit/s et bientôt 160 Gbit/s, des capacités de plusieurs dizaines de térabits par seconde (Tbit/s, ou 10^{12} bit/s) sont aujourd'hui atteintes sur la fibre optique.

Le multiplexage en longueur d'onde, ou WDM (Wavelength Division Multiplexing), consiste à émettre simultanément plusieurs longueurs d'onde, c'est-à-dire plusieurs lumières, sur un même cœur de verre. Cette technique est fortement utilisée dans les cœurs de réseau. On l'appelle DWDM (Dense WDM) lorsque le nombre de longueur d'onde devient très grand.

Les principaux avantages de la fibre optique sont les suivants :

- très large bande passante, de l'ordre de 1 GHz pour 1 km ;
- faible encombrement ;
- grande légèreté ;
- très faible atténuation ;
- très bonne qualité de transmission ;
- bonne résistance à la chaleur et au froid ;
- matière première bon marché (silice) ;
- absence de rayonnement.

Les médias hertziens

La réussite du GSM et l'arrivée des terminaux mobiles pouvant se connecter à des réseaux locaux sans fil ont rendu très populaires les supports hertziens. Ce succès est encore amplifié par l'interconnexion des équipements personnels (smartphone, tablette, PC portable, etc.).

L'ensemble des équipements terminaux mobiles utilisent la voie hertzienne pour communiquer. La transmission s'effectue par le biais d'un réseau cellulaire, une cellule étant une zone géographique dont tous les points peuvent être atteints à partir d'une même antenne. Parmi les réseaux cellulaires, on distingue les réseaux de mobiles, les réseaux satellite et les réseaux sans fil. Les réseaux de mobiles permettent aux terminaux de se déplacer d'une cellule à une autre sans coupure de la communication, ce qui, en règle générale, n'est pas le cas des réseaux sans fil. Les réseaux satellite sont d'un autre genre car ils demandent des délais de propagation bien plus longs que les réseaux terrestres.

Dans un réseau de mobiles, lorsqu'un utilisateur se déplace d'une cellule à une autre, le cheminement de l'information doit être modifié pour tenir compte de ce déplacement. Cette modification s'appelle un changement intercellulaire, ou handover, ou encore handoff. La gestion de ces handovers est souvent délicate puisqu'il faut trouver une nouvelle route à la communication, sans toutefois l'interrompre.

Chaque cellule dispose d'une station de base, ou BTS (Base Transceiver Station) dans le cas de la 2G (GSM) ou Node-B dans le cas de la 3G (UMTS) ou E-Node-B dans le cas de la 4G (LTE Advanced) ou encore point d'accès (Access Point) dans le cas du Wi-Fi, c'est-à-dire d'une antenne assurant la couverture radio de la cellule.

Nous allons décrire le cas le plus classique de la 2G (GSM), mais on trouve des situations similaires dans les autres réseaux hertziens ; seuls les noms sont en partie modifiés. Tout cela sera détaillé dans des chapitres dédiés (10, 18 et 19).

Une station de base dispose de plusieurs fréquences pour desservir à la fois les canaux de trafic des utilisateurs, un canal de diffusion, un canal de contrôle commun et des canaux de signalisation. Chaque station de base est reliée par un support physique de type câble métallique à un contrôleur de station de base, ou BSC (Base Station Controller). Le contrôleur BSC et l'ensemble des antennes BTS qui lui sont raccordées constituent un sous-système radio, ou BSS (Base Station Subsystem). Les BSC sont tous raccordés à des commutateurs du service mobile, ou MSC (Mobile service Switching Center).

L'architecture d'un réseau de mobiles 2G est illustrée à la figure 3.4.

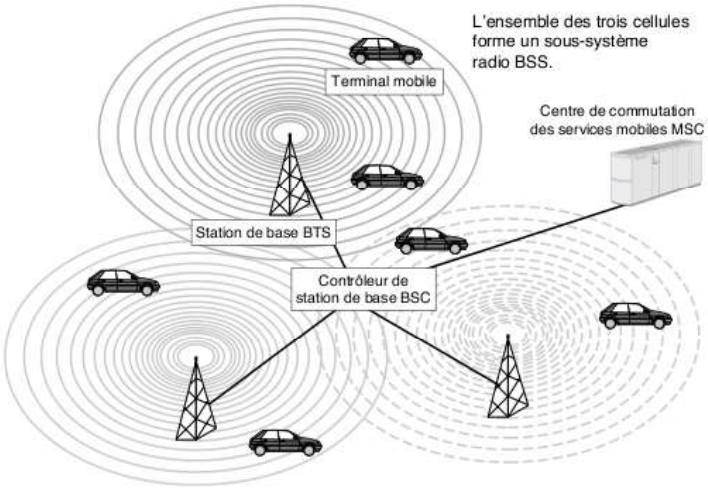

Figure 3.4.

Architecture d'un réseau de mobiles

Le câblage

Le câblage des bureaux et des entreprises nécessite des sommes souvent importantes. Lors de l'évaluation de ce coût, il faut prendre en compte non seulement le support mais aussi les équipements situés aux deux extrémités du câble. Il faut en outre évaluer les besoins afin de sélectionner et d'installer le bon câble une fois pour toutes.

Divers paramètres interviennent quant au choix des composants d'un système de câblage, tels le coût, l'environnement, les contraintes particulières des utilisateurs, la fiabilité, l'évolutivité, etc. Il est impératif de caractériser dès le départ l'environnement dans lequel est déployé le réseau. Certains environnements industriels sont critiques et nécessitent des supports spécifiques. Un environnement bruyant, par exemple, peut requérir l'emploi de la fibre optique. Le réseau peut aussi être exposé à des perturbations électromagnétiques ou climatiques. La sécurité des informations est un autre élément à prendre en compte.

La population d'utilisateurs escomptée détermine le nombre de prises nécessaires pour dimensionner le système. Il faut en outre envisager les types de trafics destinés à être supportés et en évaluer le volume — il peut être important dans le cas de transport d'images numérisées, par exemple — afin d'avoir une idée précise du niveau de fiabilité des transmissions requis, le transfert de données étant très sensible aux erreurs de transmission, contrairement au transfert de voix numérisées.

La topologie du bâtiment est une autre contrainte à prendre en compte. Certains supports sont beaucoup plus maniables que d'autres — le rayon de courbure d'une fibre optique est inférieur à celui d'un câble coaxial, par exemple —, et l'utilisation d'une fibre optique ou d'une paire métallique souple peut être nécessaire dans des bâtiments où le chemin de câblage est quelque peu tortueux.

Les infrastructures de câblage se répartissent entre réseau courant faible pour le transport de l'information (téléphonie, informatique, multimédia) et réseau courant fort pour l'alimentation électrique. Le transport de l'information requiert une puissance très inférieure, de l'ordre du milliwatt, à celle nécessaire au fonctionnement des appareils électriques, qui est de l'ordre de dizaines ou de centaines de watts.

Pour l'implantation d'un réseau de distribution courant faible, il faut décider du chemin des câbles et de la technologie à utiliser de la façon la plus générique possible, indépendamment des types d'information, de matériel et d'utilisateur auxquels le réseau est destiné.

Le plan de câblage d'une entreprise est capital pour la bonne marche des réseaux que l'on souhaite y implanter. Les sections suivantes présentent les différents plans de câblage disponibles.

Le câblage départemental

Les réseaux départementaux, que l'on appelle aussi réseaux SOHO (Small Office/Home Office), ont une taille maximale de l'ordre de la centaine de mètres.

Le rôle du câblage départemental, ou capillaire, est de distribuer les informations vers l'ensemble des bureaux dans un environnement limité. Ces réseaux capillaires sont formés par le câblage sortant du répartiteur d'étage.

La normalisation du câblage départemental a choisi comme support physique quatre paires de fils torsadées distribuées en étoile depuis un local technique central. Cette topologie est illustrée à la figure 3.5.

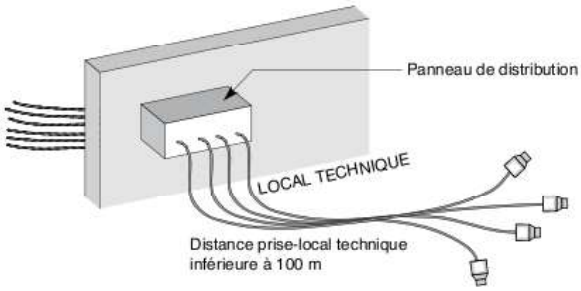

Figure 3.5

Topologie du câblage départemental

La structure en étoile permet de desservir très facilement l'ensemble des pièces du département. On compte généralement une prise pour 6 m^2. Lors du précâblage d'un immeuble neuf, il faut câbler l'ensemble de la surface avec un nombre de prises suffisant pour ne pas avoir à tirer de nouveaux fils ultérieurement. En effet, lorsqu'on câble un immeuble, le coût à la prise est très bas, comparé au même câblage dans un immeuble ancien, où des travaux d'infrastructure sont nécessaires. Si le coût de la prise d'un précâblage dans un bâtiment neuf est de 75 à 150 euros en moyenne, il faut multiplier ces chiffres par dix pour un immeuble ancien sans infrastructure de câblage.

De plus en plus, les nouveaux bâtiments sont précâblés selon une structure identique à celle des câblages du réseau téléphonique à partir du répartiteur d'étage. Quelques différences doivent toutefois être signalées :

- Le câblage peut être banalisé : on utilise dans ce cas le câble pour y raccorder indifféremment un téléphone ou un équipement informatique.
- Le câblage peut être non banalisé : on raccorde les terminaux téléphoniques sur un câble de faible diamètre et les équipements informatiques sur un câble de meilleure qualité.
- Les câbles peuvent permettre de réaliser divers types de réseaux locaux capillaires. La qualité du câble est importante en cas de contrainte de distance. Pour les réseaux à 100 Mbit/s et à 1 Gbit/s, le câble doit être d'excellente qualité pour atteindre la centaine de mètres. Le mieux est de limiter la distance entre le local technique et la périphérie à 50 m et d'utiliser un câble métallique de bonne qualité.

Dans le câblage banalisé, aussi appelé structuré ou universel, la banalisation doit être totale, et la prise du terminal unique. Le choix penche généralement en faveur de la prise

normalisée ISO 8877, qui peut se décliner de différentes façons dans chaque pays. La norme de câblage française avec une prise RJ-45 universelle est NF C 15-100 (guide UTE C 90-483). Elle est également applicable au câblage résidentiel.

Tous les câbles arrivent sur un même répartiteur, et ce sont des cordons de connexion, ou jarretières, qui sont utilisés pour connecter, dans le local technique, l'arrivée du câble banalisé aux prises donnant accès au réseau téléphonique ou informatique. Les câbles utilisés sont identiques. En règle générale, on utilise quatre paires de fils torsadées pour être compatible avec la prise RJ-45, qui possède 8 broches, 4 pour les données et 4 pour la téléalimentation.

La non-banalisation permet de poser des câbles de qualités différentes entre l'informatique et la téléphonie. Par exemple, on peut utiliser deux paires de fils torsadées blindées de très bonne qualité pour la partie informatique et quatre paires de fils torsadées non blindées pour la partie téléphonique. Du fait de cette différence entre les deux câblages, les arrivées au répartiteur d'étage sont différentes : la partie informatique arrive sur un tableau de distribution informatique et la partie téléphonique sur un tableau de distribution téléphonique.

Rien n'empêche un utilisateur de demander la pose d'un câble spécifique de meilleure qualité que celui proposé par le constructeur, de façon à éviter tout problème d'adaptation à l'environnement. Une autre solution pour prendre en compte les caractéristiques de tous les types de réseaux locaux consiste à réduire la distance maximale entre le terminal et le tableau de distribution. Cette distance doit être suffisamment courte pour supporter les débits les plus importants des produits disponibles sur le marché.

Nous venons de voir que la topologie normalisée était de type étoile. Cependant, cette topologie en étoile n'est pas toujours adaptée à l'entreprise. D'autres topologies sont possibles, comme le bus ou la boucle.

La topologie en étoile

La topologie en étoile est évidemment parfaitement adaptée à la distribution des réseaux en étoile. Les câblages des autocommutateurs privés, ou PABX, sont conformes à cette topologie. Une difficulté peut toutefois surgir de l'inadéquation des câbles aux débits proposés par les autocommutateurs. Le système de câblage peut dater de nombreuses années et n'avoir été conçu que pour faire transiter un signal analogique à 3 200 Hz de bande passante, par exemple. L'inconvénient de cette topologie en étoile est la centralisation : si le centre est défaillant, tout le système risque de s'arrêter.

La topologie en bus

Largement répandue dans les réseaux locaux Ethernet, la topologie en bus présente de nombreux avantages, en particulier celui de pouvoir être passive, c'est-à-dire sans alimentation électrique. Les câbles associés peuvent être de différents types : paires de fils métalliques ou câble coaxial 50 ou 75 Ω. La fibre optique est mal adaptée à cette structure.

Les tronçons de câble, ou brins, peuvent être raccordés entre eux par des répéteurs. Un répéteur est un organe non intelligent, qui répète automatiquement vers un deuxième câble tous les signaux passant sur un brin, comme illustré à la figure 3.6.

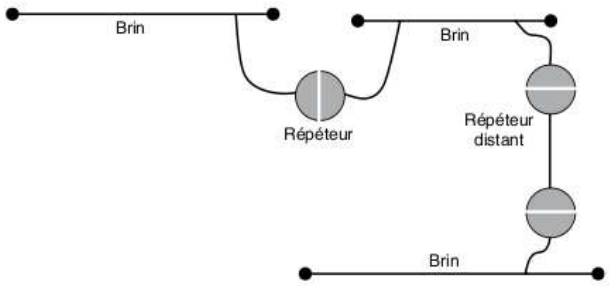

Figure 3.6

Raccordement de brins par des répéteurs

Des répéteurs distants peuvent être reliés entre eux par un autre support de communication, comme la fibre optique.

La topologie en anneau

Sur une topologie en anneau, les coupleurs qui gèrent l'accès au support physique arrêtent l'information, c'est-à-dire mémorisent pendant un certain temps les informations passant sur la boucle. Plusieurs décisions doivent être prises, telles que déterminer si la trame doit être recopiée vers la prochaine station ou détruite dans le registre, si la valeur du jeton doit être modifiée ou non, si la trame doit être recopiée vers le coupleur, etc. Il faut donc couper le support physique et ajouter un registre à décalage, comme illustré à la figure 3.7. Le registre à décalage mémorise les éléments binaires au fur et à mesure de leur arrivée. À la fin du décalage, ils sont émis sur la boucle en direction de la prochaine station. Le temps de réflexion pour prendre les décisions utiles est égal au temps des décalages et dépend donc du nombre de registres.

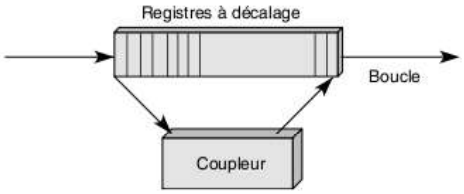

Figure 3.7

Registre à décalage du jeton sur boucle

Le coupleur prend une copie de la trame dans le premier registre. Le nombre de décalages correspond au temps de réflexion du coupleur pour modifier une information ou

en introduire une nouvelle. L'incorporation de nouveaux bits ou l'effacement de certains s'effectue sur le dernier bit du registre à décalage.

Le registre à décalage est une structure active, qui doit être alimentée électriquement. Les supports physiques en boucle doivent donc nécessairement être secourus en cas de panne ou de défaut d'alimentation. Les deux grandes techniques utilisées en cas de défaillance sont le by-pass, ou dérivation, illustré à la figure 3.8, et la structuration en étoile, détaillée plus loin.

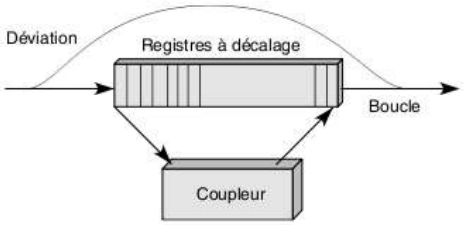

Figure 3.8

Dérivation d'un coupleur

Le passage par un registre à décalage oblige à régénérer le signal à la sortie. C'est un avantage pour la portée totale du réseau mais un défaut du point de vue de la fiabilité. En particulier, l'utilisation d'un by-pass ne permet pas la régénération du signal, ce qui oblige à faire très attention à la portée maximale entre deux coupleurs. Si la portée maximale est de 200 m et que les coupleurs soient disposés tous les 100 m, il n'y a aucun problème lorsqu'un coupleur tombe en panne. En revanche, si deux coupleurs de suite sont en panne, le signal doit parcourir 300 m sans régénération. La distance est trop grande et provoque des dégradations importantes de la qualité de l'information transmise.

Pour éviter ces problèmes, il est possible de proposer une architecture en étoile pour une topologie en boucle. Si un coupleur tombe en panne, la boucle est refermée par l'intermédiaire d'un interrupteur sur le panneau de distribution. Cette solution n'est toutefois guère satisfaisante, puisqu'elle nécessite une intervention manuelle. Dans la réalité, derrière le panneau, on utilise un concentrateur, qui est relié par des jarretières aux prises terminales du câblage. En cas de panne d'un coupleur, le concentrateur est capable de reformer la boucle d'une façon totalement passive.

Pour connecter un utilisateur supplémentaire, on étend la boucle par une nouvelle connexion. L'intérêt de cette technique est qu'elle permet la mise hors circuit, d'une façon simple, de tout élément défaillant. De plus, aucun problème ne se pose au niveau de la répétition du signal, puisqu'on passe directement d'un coupleur au coupleur actif suivant. On peut donc déconnecter les machines et les coupleurs sur l'anneau sans aucun risque pour la qualité du signal.

La distribution en étoile autour du local technique est parfaitement adaptée à cette structure.

L'arbre actif

L'arbre est une configuration qui comporte des nœuds, ou hubs, et des branches. La figure 3.9 illustre cette topologie, avec, au sommet, le nœud racine.

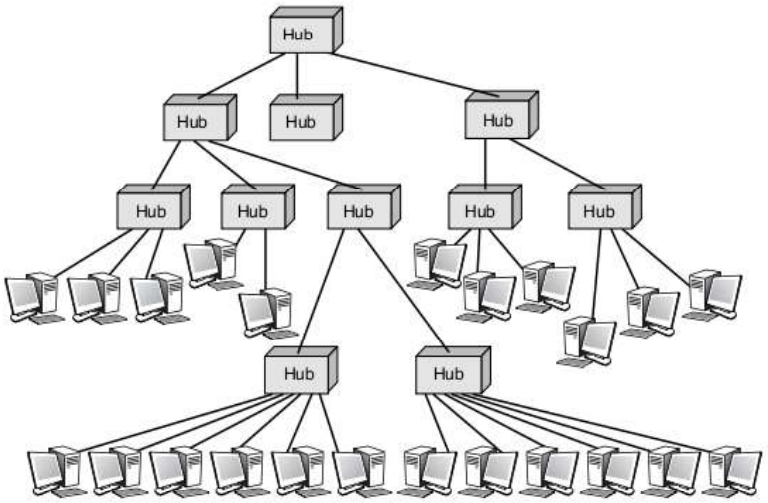

Figure 3.9

Arbre actif

L'arbre actif est caractérisé par une structure arborescente. À chaque intersection correspond un hub alimenté électriquement, dont le rôle est de répéter, dans toutes les directions possibles, une copie du message qui arrive. Cette caractéristique permet, à partir de n'importe quelle station, d'atteindre toutes les autres. Elle se retrouve sur les structures en bus, dans lesquelles, lorsqu'un émetteur envoie de l'information, toutes les stations en prennent une copie au passage et la conservent si l'adresse du destinataire correspond à leur propre adresse. Dans la structure de l'arbre actif, on a exactement les mêmes propriétés : chacun reçoit une copie, et personne n'a à se soucier de savoir qui enlève le signal du câble comme sur une boucle, les signaux disparaissant automatiquement.

Les techniques d'accès correspondant à ce type de réseau en arbre sont identiques à celles des structures en bus, à savoir les techniques Ethernet. Les réseaux en arbre actif avec la technique d'accès Ethernet s'appellent des réseaux Starlan.

La structure en arbre actif est bien adaptée à la distribution en étoile, puisqu'il suffit de placer un hub dans le local technique et de relier, sur le tableau de distribution, les fils correspondant aux machines à raccorder. Plusieurs hubs peuvent être placés dans le même local technique si le nombre de sorties n'est pas suffisant sur un seul hub.

D'autres types de connexions sont possibles à partir d'une structure en arbre, en particulier le raccordement de stations terminales à un contrôleur de communication.

Dans cet exemple, il faut pouvoir connecter le câble de sortie du terminal, correspondant aux caractéristiques du terminal sur le câblage départemental, qui n'a pas forcément la même impédance. Il faut alors ajouter un élément intermédiaire, qui effectue l'adaptation entre les deux types de câbles. Cet élément s'appelle un balun (BALanced-UNbalanced). Ce balun peut être intégré au terminal lui-même.

Le câblage d'établissement

Le câblage d'établissement a pour fonction de raccorder entre eux les différents tableaux de distribution du niveau départemental. On peut envisager pour cela trois possibilités : les rocades, les réseaux locaux et les étoiles.

Les rocades

Les rocades relient les locaux techniques par des faisceaux de câbles. Ces câbles sont utilisés indépendamment les uns des autres, à la demande, pour former des liaisons entre les panneaux de distribution. En règle générale, les rocades sont formées d'un grand nombre de paires de fils : 25, 50, 100 paires ou beaucoup plus. La réalisation d'un réseau Starlan sur trois répartiteurs d'étage est illustrée à la figure 3.10.

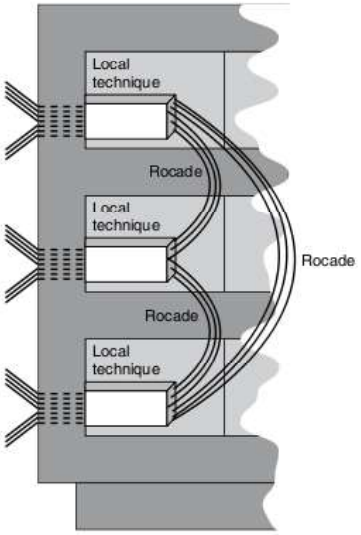

Figure 3.10

Réseau Starlan sur trois répartiteurs d'étages

Les câbles de rocade peuvent être des fibres optiques, comme on en rencontre dans de nombreux systèmes de câblage.

Les réseaux locaux

Les réseaux locaux représentent la meilleure manière de relier les panneaux de distribution, puisqu'ils ne nécessitent pas le déplacement des jarretières et garantissent une excellente productivité. Parmi les solutions possibles, les sections suivantes présentent brièvement le bus, la boucle et l'étoile.

Les réseaux locaux en bus

Si cette architecture n'est guère adaptée au cadre départemental, elle l'est à celui de l'établissement, où la connexion des différents locaux techniques peut être effectuée en série sur un bus. Les réseaux Ethernet peuvent ainsi utiliser des vitesses de 1 à 10 Gbit/s pour relier des locaux techniques à très haut débit en bus.

Les réseaux locaux en boucle

Les réseaux locaux en boucle ont connu leur heure de gloire avec le Token-Ring d'IBM, à 16 puis 100 Mbit/s, et FDDI (Fiber Distributed Data Interface). Même s'il existe encore de telles structures dans les entreprises, elles sont en voie de disparition au profit des réseaux en bus et en étoile. Nous avons représenté un réseau local en boucle à la figure 3.11.

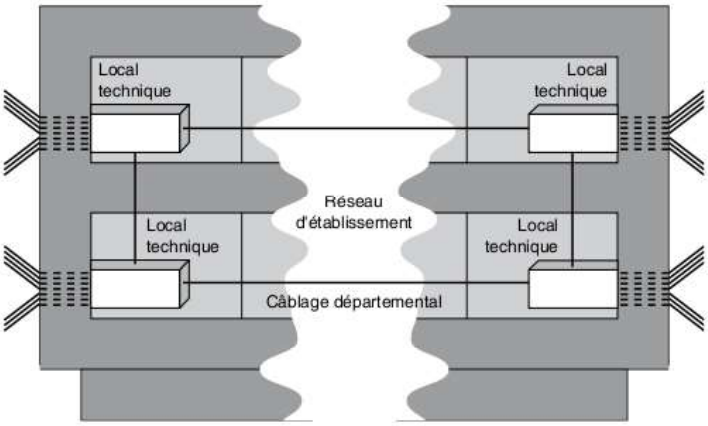

Figure 3.11

Réseau d'établissement en boucle

Les réseaux d'établissement en boucle présentent une difficulté. La régénération des signaux ne s'effectue que dans les cartes coupleurs ajoutées aux machines à connecter.

Or les seules machines à connecter dans un réseau d'établissement sont les ponts de connexion des réseaux départementaux. Les régénérations sont effectuées lorsque le signal passe par ces ponts. Si un pont tombe en panne, ou s'il est déconnecté, il faut aller jusqu'au local technique suivant pour que le signal soit régénéré. C'est la raison pour laquelle il est conseillé de doubler les équipements au niveau de l'établissement ou de limiter la distance entre deux répartiteurs d'étage. Cette dernière solution permet au signal de revenir au premier pont ou d'aller au pont suivant.

Les réseaux locaux en étoile

La connexion entre les répartiteurs d'étage ou les tableaux de distribution peut s'effectuer grâce à des étoiles optiques partant d'un point central de l'entreprise. L'étoile peut être passive et répéter dans toutes les directions les informations qui lui proviennent sur une entrée. Pour éviter de diffuser sur tous les câblages raccordés une information destinée à un seul utilisateur, il faut ajouter des ponts dans les locaux techniques.

Dans la plupart des cas, l'étoile optique est un composant passif, générant une perte en ligne importante. Pour cette raison, il ne doit pas y avoir plus de 2 ou 3 étoiles optiques passives en série entre deux points de raccordement. La figure 3.12 illustre une configuration utilisant une étoile optique.

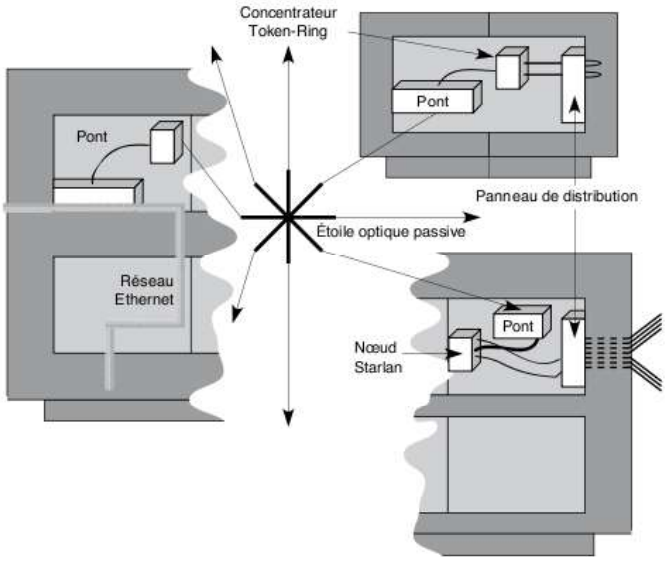

Figure 3.12

Raccordement par étoile optique

Une deuxième possibilité, beaucoup plus classique, consiste à raccorder les répartiteurs par des faisceaux de câbles qui se dirigent vers un point central. C'est la technique utilisée pour le raccordement des panneaux de distribution téléphonique à un autocommutateur privé (PABX) ou des panneaux de distribution banalisés à un PABX multiservice. Cette structure de raccordement est illustrée à la figure 3.13

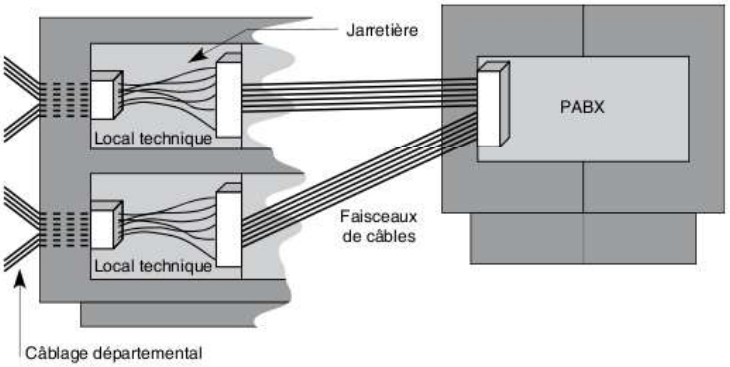

Figure 3.13

Raccordement par faisceaux de câbles

Les équipements

Les équipements sont évidemment des éléments indispensables pour gérer la transmission des signaux d'un émetteur vers un récepteur. Ces équipements sont les suivants :

- Les supports physiques d'interconnexion, qui permettent l'acheminement des signaux transportant l'information.
- Les prises (en anglais *tap*), qui assurent la connexion sur le support.
- Les adaptateurs (en anglais *transceiver*), qui se chargent notamment du traitement des signaux à transmettre (codage, sérialisation, etc.).
- Les coupleurs, aussi appelés communicateurs ou cartes de transmission, qui prennent en charge les fonctions de communication.

Les interfaces utilisateur assurent la liaison entre l'équipement à connecter et le coupleur. Les données que l'utilisateur souhaite émettre transitent par cette interface à une vitesse qui dépend de la norme choisie. En règle générale, l'interface suit les spécifications du bus de la machine à connecter sur le réseau.

Le connecteur

Le connecteur réalise la connexion mécanique. Il permet le branchement sur le support. Le type de connecteur utilisé dépend évidemment du support physique.

La fibre optique pose des problèmes de raccordement. Le cœur de la fibre étant très fin, de l'ordre de quelques microns, une intervention délicate est nécessaire pour y fixer une prise. La difficulté du branchement sur fibre optique constitue cependant un atout pour la sécurité, dans la mesure où cela en fait un support difficile à espionner, à la différence du câble coaxial.

L'avantage du fil métallique est qu'il permet d'utiliser une prise téléphonique classique, ce qui offre une grande facilité de branchement du coupleur sur le support physique. La prise RJ-45 à 8 contacts en est un exemple. C'est la prise que l'on rencontre désormais dans toutes les entreprises pour réaliser les réseaux de communication courant faible.

L'adaptateur

L'adaptateur (*transceiver*, ou transmetteur) est responsable de la connexion électrique. C'est un composant qui se trouve sur la carte qui gère l'interface entre l'équipement et le support physique. Il est chargé de la mise en série des octets, c'est-à-dire de la transmission des bits les uns après les autres, contrairement à ce qui se passe à l'interface entre la carte de communication et la machine terminale, où l'on a un parallélisme sur 8, 16 ou 32 bits. L'adaptateur effectue la sérialisation et la désérialisation des paquets, ainsi que la transformation des signaux logiques en signaux transmissibles sur le support puis leur émission et leur réception.

Selon la méthode d'accès utilisée, des fonctions supplémentaires peuvent être dévolues à l'adaptateur. Il peut, par exemple, être chargé de la détection d'occupation du câble ou de la détection des collisions de signaux. Il peut aussi jouer un rôle de sécurité en veillant à la limitation d'occupation du support par un émetteur. L'adaptateur est désormais de plus en plus intégré au coupleur.

Le coupleur

L'organe appelé coupleur, ou carte réseau ou encore carte d'accès (une carte Ethernet, par exemple), se charge de contrôler les transmissions sur le câble (*voir figure 3.14*). Le coupleur assure le formatage et le déformatage des blocs de données à transmettre ainsi que la détection d'erreur, mais très rarement les reprises sur erreur lorsqu'une erreur est découverte. Il est aussi chargé de gérer les ressources telles que les zones mémoire ainsi que l'interface avec l'extérieur.

Le débit d'un coupleur doit s'ajuster au débit permis par le câble. Par exemple, sur un réseau Ethernet possédant un support physique dont la capacité est de 100 Mbit/s, le coupleur doit émettre à cette même vitesse de 100 Mbit/s.

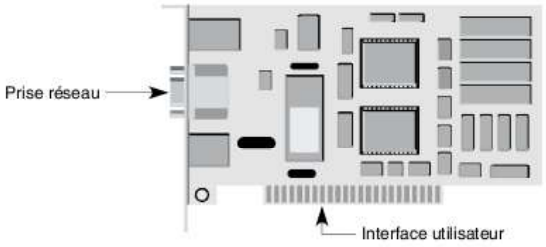

Figure 3.14

Carte coupleur

Conclusion

Ce chapitre a introduit les médias physiques qui permettent de transporter les informations qui transitent sous forme numérique d'une machine terminale à une autre. Les équipements réseaux de base ont également été présentés.

Les progrès technologiques accomplis depuis les années 2000 ont été tels que le goulet d'étranglement n'est plus situé sur l'interface d'accès au médium de transport mais sur le réseau d'accès permettant de raccorder l'équipement terminal à la machine de connexion de l'opérateur. Les interfaces et les supports physiques ou hertziens utilisés sont devenus suffisamment équilibrés pour permettre à chaque client du réseau d'entrer dans l'ère du multimédia.