

Partie I

Les éléments de base des réseaux

Les réseaux ont pour fonction de transporter des informations afin de réaliser des services pouvant se trouver n'importe où sur le globe. Une série d'équipements matériels et de processus logiciels sont mis en œuvre pour assurer ce transport, depuis les câbles terrestres ou les ondes radio dans lesquels circulent les données jusqu'aux protocoles et règles permettant de les traiter.

Cette première partie de l'ouvrage rappelle les principes de fonctionnement des réseaux et présente en détail les matériels, les logiciels et les architectures protocolaires sur lesquels ils se fondent.

1

Introduction aux réseaux

Les réseaux sont nés du besoin de transporter des données d'un ordinateur à un autre ordinateur. Ces données étant mises sous la forme de fichiers, l'application de base des réseaux est donc le transfert de fichiers. Un peu plus tard, le « transactionnel » est apparu pour permettre à un utilisateur de réaliser des transactions avec un ordinateur distant, par exemple réserver une place d'avion. La session correspond à l'ensemble des transactions d'un même utilisateur pour réaliser une tâche donnée.

Avec l'apparition du Web, le service transactionnel s'est diversifié afin de permettre la recherche d'information par le biais de liens. Ces applications s'appellent client-serveur, c'est-à-dire qu'un client s'adresse à un serveur pour obtenir de l'information.

L'étape suivante des réseaux a été caractérisée par le pair-à-pair, ou P2P (*peer-to-peer*). Dans cette application, tous les éléments connectés au réseau sont équivalents et peuvent être distribués dans le réseau. Les applications pair à pair sont bien connues, en particulier de ceux qui recherchent des fichiers audio ou vidéo sur Internet. Les applications sous-jacentes sont en fait très nombreuses, allant de la téléphonie à la recherche d'informations diverses et variées.

Sans que cela supprime les applications de transfert de fichiers, qu'elles soient client-serveur ou pair à pair, le nouveau service Internet qui se développe depuis les années 2010 est le *Cloud*, ou « nuage ». Jusqu'à l'arrivée des Clouds, le réseau Internet avait pour objectif de transporter des données pour réaliser un service à distance. Les entreprises permettaient aux itinérants de se connecter à leurs serveurs par le biais d'Internet. Elles possédaient tous les serveurs nécessaires à cela, comme la messagerie électronique, les applications métier ou les serveurs d'archivage, ainsi que la puissance de calcul nécessaire. Aujourd'hui, il est possible de réaliser dans le Cloud ce qui se faisait auparavant dans l'entreprise : calcul, stockage, application métier, messagerie, téléphonie, etc. Les avantages sont nombreux : le client peut accéder à ces services de n'importe où ; ils

peuvent être sécurisés par de la redondance ; on peut ajouter instantanément de nouveaux services, de la puissance de calcul, de l'espace de stockage, etc., au fur et à mesure des besoins, en ne payant que ce qui est utilisé.

Cette nouvelle génération met en œuvre le concept de virtualisation, par lequel les ressources dont l'entreprise ou le particulier à besoin peuvent se trouver n'importe où, voire se déplacer en fonction du coût des serveurs.

Avant de détailler plus avant dans ces nouvelles générations de réseaux, nous allons rappeler quelques éléments clés de l'évolution des réseaux et des architectures actuelles.

Transfert, commutation et routage

Les réseaux modernes sont apparus au cours des années 1960 à la faveur d'une technologie totalement nouvelle permettant de transporter de l'information d'une machine à une autre. Ces machines étaient alors des ordinateurs de première génération, nettement moins puissants qu'un smartphone actuel. Les réseaux de téléphonie existaient quant à eux depuis longtemps. Ils utilisaient la technologie dite de *commutation de circuits* et le support de lignes physiques reliant l'ensemble des téléphones par le biais de commutateurs. Lors d'une communication, ces lignes physiques ne pouvaient être utilisées que par les deux utilisateurs en contact. Le signal qui y transitait était de type analogique.

La première révolution des réseaux a été apportée par la technologie numérique des codecs (codeur-décodeur), qui permettaient de transformer les signaux analogiques en signaux numériques, c'est-à-dire une suite de 0 et de 1. Le fait de traduire tout type d'information sous forme de 0 et de 1 permettait d'unifier les réseaux. Dans cette génération, la commutation de circuits était toujours fortement utilisée. Les circuits étant devenus numériques, la question s'est posée de faire passer simultanément sur un même circuit plusieurs flots, correspondant à des applications différentes. C'est ainsi qu'on a pu, par exemple, avoir 1 octet (8 bits) de téléphonie, suivi de 2 bits de transfert de fichiers puis de 8 bits d'application vidéo. Cette solution ne s'est toutefois quasiment pas développée et a laissé la place au transfert de paquets.

Le transfert de paquets a permis de prendre en compte la forte irrégularité du débit de la communication entre deux ordinateurs, alternant les périodes de débit important et les périodes de silence, résultant du fait que, par exemple, un ordinateur doit attendre la réponse d'un autre ordinateur.

Dans la commutation de circuits, le circuit reste inutilisé pendant les périodes de silence, induisant un important gaspillage des ressources. À l'inverse, le transfert de paquets n'utilise les ressources du réseau que lors de l'émission effective des paquets. L'idée s'est donc fait jour de constituer des blocs d'information de longueur variable et de les envoyer de nœud de transfert en nœud de transfert jusqu'à atteindre la destination. Les ressources d'une liaison entre deux nœuds ne sont de la sorte utilisées que pendant le transfert des paquets. Les différents paquets provenant d'un même utilisateur et d'une même application forment un *flot*. Une fois les paquets de ce flot parvenus à destination, il est possible

d'utiliser la même liaison et les ressources du réseau pour le passage d'autres paquets, provenant d'autres flots.

Parmi les nombreuses solutions de transfert de paquets qui ont été proposées, deux ont résisté au temps, le routage de paquets et la commutation de paquets. Dans le routage de paquets, les paquets sont aiguillés par chaque nœud de transfert en fonction de leur destination. La route choisie peut être différente selon l'état du réseau, de telle sorte que deux paquets d'un même flot peuvent suivre une route différente. Des *tables de routage* sont implémentées dans ces nœuds afin d'optimiser le transport des paquets en fonction de l'état du réseau.

Issue du monde des télécommunications, la commutation de paquets consiste à mettre en place, avant d'envoyer le moindre paquet, un chemin entre les entités en communication, chemin que tous les paquets d'un même flot doivent emprunter. Ce chemin (*path* en anglais) a pendant longtemps été appelé *circuit virtuel* parce que les paquets utilisant d'autres chemins peuvent utiliser les mêmes ressources. Il n'y a donc pas de ressource réservée.

Chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients. Le routage est une technique souple. Dans la mesure où chaque paquet transporte l'adresse du destinataire, la route peut varier sans difficulté, et le paquet n'est jamais perdu. En revanche, il est très difficile d'y assurer une qualité de service, c'est-à-dire de garantir que le service de transport sera capable de respecter une performance déterminée. Avec la commutation de paquets, la qualité de service est plus facilement assurée, puisque tous les paquets suivent un même chemin et qu'il est possible de réserver des ressources ou de déterminer par calcul si un flot donné a la possibilité de traverser le réseau sans encombre.

La principale faiblesse de la commutation de paquets réside dans la mise en place du chemin que vont suivre les différents paquets d'un flot. Ce chemin est ouvert par une procédure spécifique, appelée *signalisation* : on signale au réseau l'ouverture d'un chemin, lequel doit en outre être « marqué » afin que les paquets du flot puissent le suivre. Cette signalisation exige d'importantes ressources, ce qui rend les réseaux à commutation de paquets sensiblement plus chers que les réseaux à routage de paquets.

La figure 1.1 illustre ces deux branches du transfert de paquets, le routage et la commutation, ainsi que les principales techniques qu'elles utilisent.

Ces deux catégories de réseaux se sont développées en parallèle. Au départ, il n'y avait que peu de concurrence entre ces deux catégories qui s'adressaient à des mondes différents. Avec le temps, les techniques de routage, liées à Internet, se sont étendues au transport d'applications synchrones telles que la téléphonie et la vidéo. En parallèle, la commutation de paquets prenait en charge la téléphonie et la télévision. Aujourd'hui, tous deux sont en concurrence pour le transport des applications multimédias. Leurs avantages et inconvénients auraient plutôt tendance à faire choisir la commutation de paquets par les opérateurs et les très grandes entreprises et le routage par les petites et moyennes entreprises.

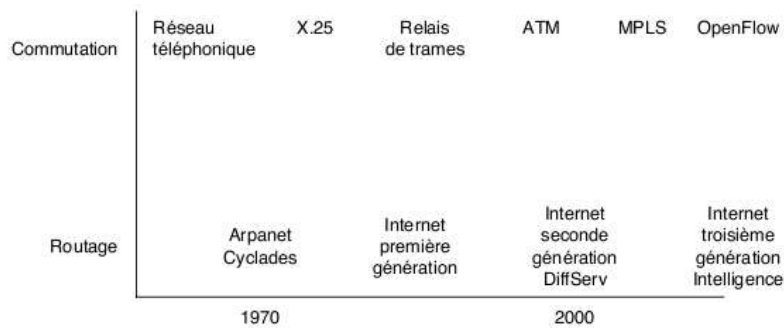


FIGURE 1.1

Les deux branches du transfert de paquets

Les techniques de routage n'ont que peu changé. Le protocole IP (Internet Protocol) en constitue le principal déploiement : le paquet IP contenant l'adresse complète du destinataire est routé dans des nœuds de transfert appelés routeurs.

À l'inverse, les protocoles liés à la commutation ont beaucoup évolué. La première grande norme de commutation, X.25, a vu le jour dans les années 1980. Cette solution exigeait des opérations importantes pour effectuer la commutation : le chemin était tracé dans le réseau par un ensemble d'indices, appelés *références*, constituant autant de « pierres blanches » sur le chemin. Le paquet suivait le chemin indiqué par les « pierres blanches » jusqu'à destination. Avec l'accroissement vertigineux du nombre de flots, les couleurs des pierres pour indiquer les chemins sont devenues insuffisantes. Une nouvelle signalisation a été introduite avec le relais de trames puis avec la technique ATM (Asynchronous Transfer Mode). Aujourd'hui de nouvelles solutions se mettent en place avec les techniques SDN (Software Defined Networking) que nous verrons en détail dans la suite.

Avant d'aller plus loin, il nous faut avancer un peu plus en détail dans la notion de paquet. Un paquet n'est pas un bloc de données que l'on peut envoyer tel quel sur une ligne de communication. Par exemple, si l'on envoie deux paquets collés l'un à l'autre, le récepteur est incapable de distinguer la fin du premier paquet et le début du second. Pour permettre cette opération de reconnaissance, il faut encapsuler chaque paquet dans une trame. La trame possède une succession spécifique d'éléments binaires permettant de reconnaître son début et sa fin. Pour transporter un paquet IP, on peut l'encapsuler dans une trame PPP (Point-to-Point Protocol) ; pour transporter un paquet X.25, on l'encapsule dans une trame LAP-B ; pour transporter un paquet IP dans une trame Ethernet, il faut ajouter une suite assez longue, nommée drapeau, contenant une succession de 10 pour se terminer au bout de 8 octets par 11 (10101010.....11).

Dans les générations de réseaux suivantes, l'adresse complète du destinataire, ou la référence, est reportée dans la trame afin d'en simplifier la récupération : il n'est de la sorte plus nécessaire de décapsuler la trame pour récupérer le paquet et les informations qu'il contient. Cette solution, mise en œuvre notamment dans le relais de trames et la technique MPLS (MultiProtocol Label-Switching), simplifie énormément le travail effectué dans les nœuds de transfert.

Les réseaux avec et sans fil

L'apparition de la technologie paquet dans les réseaux de mobiles et les réseaux sans fil date du début des années 2000 avec l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). La génération d'avant, le GSM (Global System for Mobile Communications), était fondée sur le circuit. Les réseaux de mobiles permettent la communication tout en se déplaçant. Dans les réseaux sans fil, la communication se fait par le biais d'une antenne, et l'utilisateur doit rester connecté à la même antenne. Les premiers réseaux hertziens avaient des débits très limités, mais ils ont vite atteint des performances quasiment identiques à celles des réseaux terrestres, du moins sur les paires métalliques.

Les réseaux hertziens sont regroupés en deux catégories, l'une provenant des industriels des télécommunications – et donc de la commutation –, avec une signalisation importante et une forte complexité pour prendre en charge tous les problèmes de la communication, l'autre provenant d'Internet – et donc du routage –, avec beaucoup moins de complexité mais une qualité globale inférieure.

La quatrième génération de réseaux de mobiles (4G) est devenue complètement compatible avec Internet. Elle atteint des débits identiques à ceux des modems ADSL ou des accès fibre optique. Il y a donc uniformisation des mondes filaires et sans fil, de telle sorte qu'un même réseau cœur, le réseau de fibre optique central, permet d'interconnecter un terminal fixe aussi bien qu'un terminal mobile. Cette convergence, que nous décrirons plus en détail dans la suite de ce livre, par le biais d'un réseau cœur unique est appelée NGN (Next Generation Network).

Ces réseaux filaires ou sans fil sont multimédias. Une application multimédia utilise en même temps l'image animée, la parole, le graphisme et des assistances diverses.

Les caractéristiques de cette convergence sont les suivantes :

- Débits très importants dans le réseau cœur, notamment du fait de l'augmentation de la puissance des machines terminales et du débit de chaque client vers le réseau cœur.
- La qualité de service pour réaliser les contraintes de chaque application.
- La sécurisation du transport.
- La gestion de la mobilité et du raccordement à plusieurs réseaux simultanément (multihoming).
- La virtualisation de toutes les ressources du réseau pour réaliser des Clouds.

Le transfert de paquets

La technique utilisée pour le transport des données sous forme numérique, c'est-à-dire sous forme de 0 et de 1, que l'on a adoptée depuis la fin des années 1960 s'appelle le transfert de paquets.

Toutes les informations à transporter sont découpées en paquets pour être acheminées d'une extrémité à une autre du réseau. Cette technique est illustrée à la figure 1.2. L'équipement terminal A souhaite envoyer un message à B. Le message est découpé en trois paquets, qui sont émis de l'équipement terminal vers le premier nœud du réseau, lequel les envoie à un deuxième nœud, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'ils arrivent à l'équipement terminal B. En fait une étape supplémentaire est nécessaire : l'encapsulation du paquet dans une trame pour réaliser le transport sur les lignes de communication.

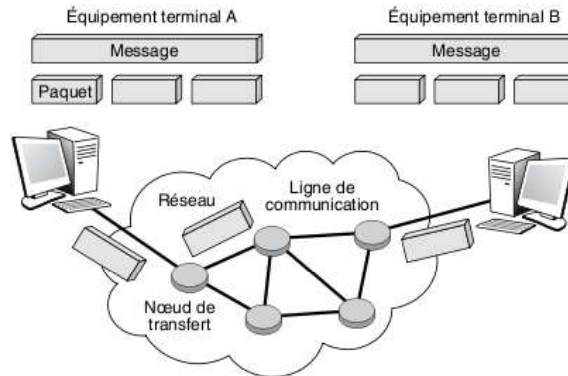


FIGURE 1.2

Le transfert de paquets

Le paquet peut provenir de différentes sources. À la figure 1.2, nous supposons que la source est un message préparé par l'émetteur, tel qu'une page de texte éditée au moyen d'un traitement de texte. Le terme message est en fait beaucoup plus vaste et recoupe toutes les formes sous lesquelles de l'information peut se présenter. Cela va d'une page Web à un flot de parole téléphonique représentant une conversation.

Dans la parole téléphonique, l'information est regroupée pour être placée dans un paquet, comme illustré à la figure 1.3. Le combiné téléphonique contient un équipement qui transforme la parole analogique en une suite d'éléments binaires. Ces bits remplissent petit à petit le paquet. Dès que celui-ci est plein, il est émis vers le destinataire. Une fois le paquet arrivé à la station terminale, le processus inverse s'effectue, restituant les bits régulièrement à partir du paquet pour reconstituer la parole téléphonique.

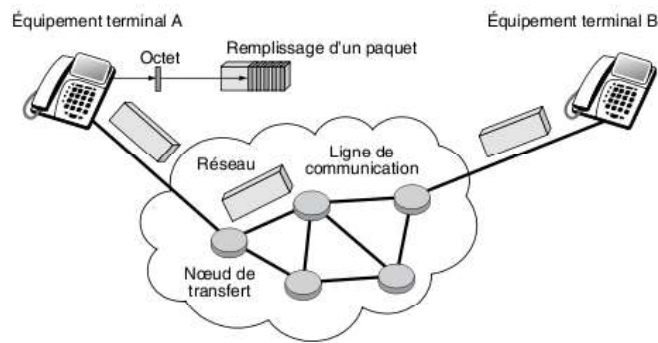


FIGURE 1.3

Flot de paquets téléphoniques

Le réseau de transfert est composé de nœuds, appelés nœuds de transfert, reliés entre eux par des lignes de communication, sur lesquelles sont émis les éléments binaires constituant les paquets. Le travail d'un nœud de transfert consiste à recevoir des paquets et à déterminer vers quel nœud suivant ces derniers doivent être acheminés.

Le paquet forme donc l'entité de base, transférée de nœud en nœud jusqu'à atteindre le récepteur. Suivant les cas, ce paquet peut être regroupé avec d'autres paquets pour reconstituer l'information transmise. L'action consistant à remplir un paquet avec des octets s'appelle la mise en paquet, ou encore la paquetsation, et l'action inverse, consistant à retrouver un flot d'octets à partir d'un paquet, la dépaquetsation.

L'architecture d'un réseau est définie principalement par la façon dont les paquets sont transmis d'une extrémité à une autre du réseau. De nombreuses possibilités existent pour cela, comme celles consistant à faire passer les paquets toujours par la même route ou, au contraire, à les faire transiter par des routes distinctes de façon à minimiser les délais de traversée.

Le modèle de référence

Pour identifier correctement toutes les composantes nécessaires à la bonne marche d'un réseau à transfert de paquets, un modèle de référence a été mis au point. Ce modèle définit une partition de l'architecture en sept niveaux, prenant en charge l'ensemble des fonctions nécessaires au transport et à la gestion des paquets. Ces sept couches de protocoles ne sont pas toutes indispensables, notamment aux réseaux sans visée généraliste. Chaque niveau, ou couche, offre un service au niveau supérieur et utilise les services du niveau inférieur.

Pour offrir ces services, les couches disposent de protocoles, qui appliquent les algorithmes nécessaires à la bonne marche des opérations, comme l'illustre la figure 1.4. Nous supposons ici que l'architecture protocolaire est découpée en sept niveaux, ce qui est le cas du modèle de référence.

La couche 3, ou couche réseau, représente le niveau paquet, qui définit les algorithmes nécessaires pour que les entités de cette couche, les paquets, soient acheminées correctement de l'émetteur au récepteur. La couche 7 correspond au niveau application. Le rôle du protocole de la couche 7 est de transporter correctement l'entité de niveau application, le message utilisateur, de l'équipement émetteur à l'équipement récepteur. La couche 2, ou couche liaison, représente le niveau trame. Elle permet de transférer le paquet sur une ligne physique. En effet, un paquet ne contenant pas de délimiteur, le récepteur ne peut en déterminer la fin ni identifier le commencement du paquet suivant. Pour transporter un paquet, il faut donc le mettre dans une trame, qui, elle, comporte des délimiteurs. On peut aussi encapsuler un paquet dans un autre paquet, lui-même encapsulé dans une trame.

Dans cet ouvrage, nous distinguons les mots « paquet » et « trame » de façon à bien différencier les entités qui ne sont pas transportables directement, comme le paquet IP, et les entités transportables directement par la couche physique, comme les trames Ethernet ou ATM.

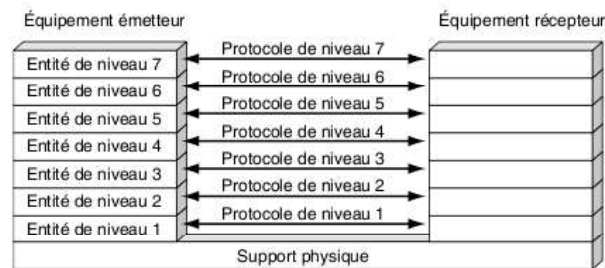


Figure 1.4

Architecture protocolaire d'un réseau à sept niveaux

La structure en couches de l'architecture protocolaire des réseaux simplifie considérablement leur compréhension globale et facilite leur mise en œuvre. Il est possible de remplacer une couche par une autre de même niveau sans avoir à toucher aux autres couches. On peut, par exemple, remplacer la couche 3 par une couche 3 prime (3') sans modifier les couches 1, 2, 4, 5, 6 ou 7. On ne modifie de la sorte qu'une partie de l'architecture, la couche 3, sans toucher au reste. Les interfaces entre les couches doivent être respectées pour réaliser ces substitutions : l'interface de la couche 3' avec les couches 2 et 4 doit garantir que les couches 2 et 4 n'ont pas à être modifiées.

L'architecture illustrée à la figure 1.4 sert de référence à toutes les architectures réseau, d'où son nom de modèle de référence. Une autre architecture protocolaire, l'architecture TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), a été définie un peu avant le modèle de référence par le ministère américain de la Défense. Son rôle premier était d'uniformiser l'interface extérieure des différents réseaux utilisés par le département d'État américain de façon à les interconnecter facilement. C'est cette architecture TCP/IP qui a été adoptée pour le réseau Internet, ce qui lui a offert une diffusion massive.

Une autre architecture, provenant de l'utilisation de la trame plutôt que du paquet, a été proposée par l'UIT-T (Union internationale des télécommunications-standardisation du secteur télécommunications), pour les applications utilisant à la fois les données, la téléphonie et l'image. Provenant principalement du monde des télécommunications, cette architecture est bien adaptée au transport de flux continus, comme la parole téléphonique. C'est la trame ATM (Asynchronous Transfer Mode) qui représente le mieux cette architecture. Cependant, cette architecture a pratiquement disparu, la trame ATM étant remplacée par la trame Ethernet. En 2012, une nouvelle architecture a été introduite, le SDN (Software Defined Networking), qui utilise la puissance du Cloud pour effectuer les calculs des routes ou des chemins. La révolution apportée par cette architecture concerne la centralisation des décisions, qui étaient auparavant distribuées. Nous examinerons cette nouvelle architecture au chapitre 17, dévolu au SDN et à OpenFlow.

Commutation et routage

Sous le concept de transfert de paquets, deux grandes techniques se disputent la suprématie : la commutation de paquets et le routage de paquets. Dans le routage, les paquets d'un même client peuvent prendre des routes différentes, tandis que, dans la commutation, tous les paquets d'un même client suivent un chemin déterminé à l'avance. De nombreuses variantes de ces techniques ont été proposées, comme nous le verrons dans la suite de l'ouvrage.

Certaines applications, comme la parole téléphonique, posent des problèmes spécifiques de transport lorsqu'elles sont acheminées sous forme de paquets. La difficulté réside dans la récupération du synchronisme, le flot de parole devant être reconstitué au récepteur avec des contraintes temporelles fortes.

En supposant qu'une conversation téléphonique entre deux individus accepte un retard de 150 ms, il n'est possible de resynchroniser les octets à la sortie que si le temps total de paquetsation-dépaquetsation et de traversée du réseau est inférieur à 150 ms. Des fonctions intelligentes implémentées dans les terminaux informatiques permettent cette resynchronisation. Si un terminal ne dispose pas d'une telle intelligence, la reconstruction du flux synchrone est quasiment impossible après la traversée d'un réseau à transfert de paquets un tant soit peu complexe. Les réseaux de type Internet ont du mal à prendre en compte ces contraintes.

Les réseaux informatiques

Les réseaux informatiques sont nés du besoin de relier des terminaux distants à un site central puis des ordinateurs entre eux et enfin des machines terminales, telles que stations de travail ou serveurs. Dans un premier temps, ces communications étaient destinées au transport des données informatiques. Aujourd'hui, l'intégration de la parole téléphonique et de la vidéo est généralisée dans les réseaux informatiques, même si cela ne va pas sans difficulté.

On distingue généralement cinq catégories de réseaux informatiques, différenciées par la distance maximale séparant les points les plus éloignés du réseau :

- Les réseaux personnels, ou PAN (Personal Area Network), qui interconnectent sur quelques mètres des équipements personnels tels que téléphone mobile, portables, organiseurs, etc., d'un même utilisateur.
- Les réseaux locaux, ou LAN (Local Area Network), qui correspondent par leur taille aux réseaux intra-entreprise. Ils servent au transport de toutes les informations numériques de l'entreprise. En règle générale, les bâtiments à câbler s'étendent sur plusieurs centaines de mètres. Les débits de ces réseaux vont aujourd'hui de quelques mégabits à plusieurs centaines de mégabits par seconde.
- Les réseaux métropolitains, ou MAN (Metropolitan Area Network), qui permettent l'interconnexion des entreprises ou éventuellement des particuliers sur un réseau spécialisé à haut débit qui est géré à l'échelle d'une métropole. Ils doivent être capables d'interconnecter les réseaux locaux des différentes entreprises pour leur donner la possibilité de dialoguer avec l'extérieur.
- Les réseaux régionaux, ou RAN (Regional Area Network), ont pour objectif de couvrir une large surface géographique. Dans le cas des réseaux sans fil, les RAN peuvent avoir une cinquantaine de kilomètres de rayon, ce qui permet, à partir d'une seule antenne, de connecter un très grand nombre d'utilisateurs. Cette solution devrait profiter du dividende numérique, c'est-à-dire des bandes de fréquences de la télévision analogique, qui seront libérées après le passage au tout-numérique, fin 2011 en France. Les réseaux RAN sont introduits plus en détail au chapitre 9, consacré aux réseaux d'accès terrestres.
- Les réseaux étendus, ou WAN (Wide Area Network), sont destinés à transporter des données numériques sur des distances à l'échelle d'un pays, voire d'un continent ou de plusieurs continents. Le réseau est soit terrestre, et il utilise en ce cas des infrastructures au niveau du sol, essentiellement de grands réseaux de fibre optique, soit hertzien, comme les réseaux satellite, mais seulement pour des applications particulières à débit faible.

La figure 1.5 illustre sommairement ces grandes catégories de réseaux informatiques.

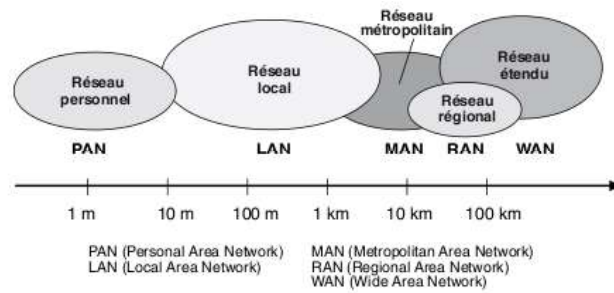


Figure 1.5

Les grandes catégories de réseaux informatiques

Les techniques utilisées par les réseaux informatiques proviennent toutes du transfert de paquets IP (Internet Protocol) généralement encapsulés dans des trames Ethernet. Ces techniques sont étudiées tout au long de l'ouvrage.

Une caractéristique essentielle des réseaux informatiques, qui les différencie des autres catégories de réseaux que nous présentons dans la suite de ce chapitre, est la gestion et le contrôle du réseau, qui sont effectués en grande partie par les équipements terminaux. Par exemple, pour qu'il n'y ait pas d'embouteillage de paquets dans le réseau, l'équipement terminal doit se réguler lui-même de façon à ne pas inonder le réseau de paquets. Pour se réguler, l'équipement terminal mesure le temps de réponse aller-retour. Si ce temps de réponse grandit trop, le terminal ralentit son débit. Cette fonctionnalité est rendue possible par l'intelligence qui se trouve dans les machines terminales commercialisées par l'industrie informatique.

Généralement beaucoup plus simple, l'intérieur du réseau est constitué de nœuds de transfert élémentaires et de lignes de communication. Le coût du réseau est surtout supporté par les équipements terminaux, qui possèdent toute la puissance nécessaire pour réaliser, contrôler et maintenir les communications.

Les réseaux informatiques forment un environnement asynchrone. Les données arrivent au récepteur à des instants qui ne sont pas définis à l'avance, et les paquets peuvent mettre un temps plus ou moins long pour parvenir à leur destinataire en fonction de la saturation du réseau. Cette caractéristique explique la difficulté de faire passer de la parole téléphonique dans ce type de réseau, puisque cette application fortement synchrone nécessite de remettre au combiné téléphonique des octets à des instants précis. Nous détaillons dans la suite de l'ouvrage les moyens de retrouver cette synchronisation dans un réseau asynchrone.

Aujourd'hui, le principal réseau informatique est Internet. Le réseau Internet transporte des paquets dits IP (Internet Protocol). Plutôt que de parler de réseau Internet, nous préférons parler de réseau IP, qui marque une plus grande généralité. Les réseaux IP sont des réseaux qui transportent des paquets IP d'une machine terminale à une autre. En un

certain sens, Internet est un réseau IP particulier. D'autres réseaux, comme les réseaux intranet, transportent également des paquets IP, mais avec des caractéristiques différentes d'Internet.

Les réseaux de télécommunications

Les opérateurs et les industriels des télécommunications ont une vision des réseaux différente de celle des informaticiens. Leur application de base, la parole téléphonique, impose de sévères contraintes, telles que la synchronisation aux extrémités ou le temps de traversée du réseau, qui doit être limité. À l'inverse des réseaux informatiques, qui partent d'un environnement asynchrone et doivent l'adapter pour accepter des applications synchrones, les réseaux de télécommunications sont fondés par essence sur le passage d'applications fortement synchrones.

La parole est une application temps réel, qui exige que les signaux soient remis au récepteur à des instants précis dans le temps. On dit que cette application est isochrone pour bien préciser cette demande de forte synchronisation.

La solution qui a été utilisée quasiment depuis les débuts des télécommunications pour résoudre le problème de la synchronisation est la commutation de circuits. Cette technique consiste à mettre en place entre l'émetteur et le récepteur un circuit physique n'appartenant qu'aux deux utilisateurs en relation. La synchronisation correspond à la remise d'un octet à intervalle régulier. Un équipement appelé codec (codeur-décodeur) transforme la parole en octet à l'émetteur et fait la démarche inverse au récepteur. Le codec doit recevoir les échantillons d'un octet à des instants précis. La perte d'un échantillon de temps en temps n'est pas catastrophique, puisqu'il suffit de remplacer l'octet manquant par le précédent. En revanche, si ce processus de perte se répète fréquemment, la qualité de la parole se détériore.

Les réseaux de télécommunications orientés vers le transport de la parole téléphonique sont relativement simples et n'ont pas besoin d'une architecture complexe. Ils utilisent des commutateurs de circuits, ou autocommutateurs. Il y a une trentaine d'années, lorsqu'on a commencé à imaginer des réseaux intégrant la téléphonie et l'informatique, la seule solution proposée se fondait sur des circuits, un circuit pour la parole téléphonique et un autre pour faire circuler les paquets de données.

Des recherches menées au début des années 1980 ont conduit les industriels et les opérateurs des télécommunications à adopter le transfert de paquets, mais en l'adaptant au transport intégré de l'information (parole téléphonique plus données informatiques). Appelée Asynchronous Transfer Mode (ATM), ou mode de transfert asynchrone, cette technique est un transfert de paquets très particulier, dans lequel tous les paquets ont une longueur à la fois fixe et très petite. En fait, ce paquet dont la longueur est constante est une trame. Il est simple d'y retrouver le début et la fin des paquets puisqu'il suffit de compter le nombre d'octets. Avec l'adoption, en 1988, du transfert de trames ATM, le monde des télécommunications a connu une véritable révolution.

La technique ATM n'a cependant pu résister à l'arrivée massive d'Internet et de son paquet IP. Toutes les machines terminales provenant du monde informatique ayant adopté l'interface IP, le problème du transfert des paquets est devenu celui des paquets IP. Le monde des télécommunications admet, depuis le début des années 2000, que les réseaux doivent posséder des interfaces IP. Ce qui fait encore débat, c'est la façon de transporter les paquets IP d'un terminal à un autre. Le monde des télécommunications propose, comme nous l'examinons en détail dans la suite de l'ouvrage, d'encapsuler le paquet IP dans une trame puis de transporter cette trame et de la décapsuler à l'arrivée pour retrouver le paquet IP.

La figure 1.6 illustre le cas général où le paquet IP est encapsulé dans une trame, classiquement la trame Ethernet, laquelle est transportée dans le réseau de transfert. Le cas de l'encapsulation dans un réseau ATM demande une étape supplémentaire, consistant à découper le paquet IP, puisque la trame ATM est beaucoup plus petite que le paquet IP.

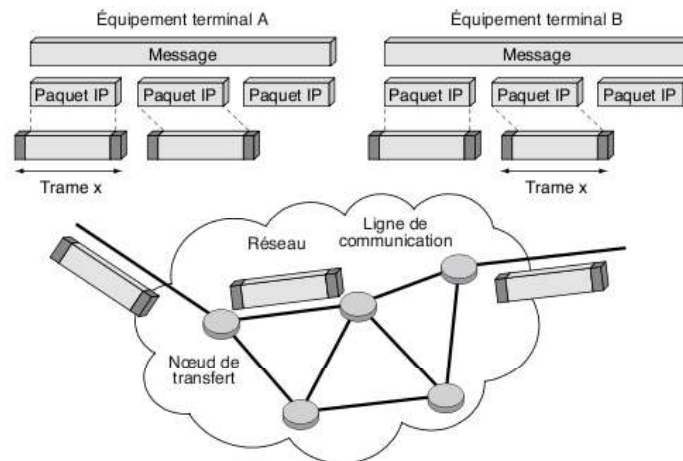


Figure 1.6

Encapsulation du paquet IP dans une trame

En résumé, les réseaux de télécommunications sont passés d'une technologie circuit à une technologie paquet. Malgré le succès du transfert ATM, optimisé pour le multimédia, l'utilisation du paquet IP et son encapsulation dans une trame Ethernet sont devenues incontournables. Une question en suspens réside dans la façon de transporter le paquet IP pour assurer une qualité de service.

Les réseaux des câblo-opérateurs

Les opérateurs vidéo et les câblo-opérateurs ont pour mission de mettre en place des réseaux câblés et hertziens chargés de transmettre les images de télévision par la voie terrestre ou hertzienne. Cette infrastructure de communication fait transiter des canaux vidéo vers l'utilisateur final. L'amortissement du câblage ou des relais hertziens passe par la mise à disposition des utilisateurs de nombreux canaux de télévision.

Les opérateurs hertziens assurent depuis de longues années la diffusion de canaux de télévision. Leur réseau était essentiellement analogique jusqu'au début des années 2000. Sa numérisation est finalisée depuis 2011 en France, aussi bien pour la télévision par satellite que pour la TNT (télévision numérique terrestre), par le biais de relais numériques terrestres dans ce dernier cas.

Il existe une grande variété de qualités d'images vidéo, depuis les images saccadées et de faible définition jusqu'aux images animées de très bonne qualité. La classification des applications vidéo, effectuée suivant le niveau de qualité des images, est généralement la suivante :

- **Visioconférence.** D'une définition relativement faible, sa fonction est de montrer le visage du correspondant. Pour gagner en débit, on diminue le nombre d'image par seconde. La visioconférence se transporte aisément sur un canal numérique à 128 Kbit/s au moyen d'une compression simple à réaliser. On peut abaisser le débit jusqu'à 64 Kbit/s, voire moins, au prix d'une qualité dégradée.
- **Télévision.** Correspond à un canal de 4 ou 5 MHz de bande passante en analogique. La numérisation de ce canal permet d'obtenir un débit de plus de 200 Mbit/s. Grâce à la compression, on peut faire descendre ce débit à 2 Mbit/s, pratiquement sans perte de qualité, voire à quelques centaines de kilobits par seconde avec une compression poussée, mais au prix d'une qualité parfois dégradée. De plus, à de tels débits, les erreurs en ligne deviennent gênantes, car elles perturbent l'image au moment de la décompression. Un compromis est à trouver entre une forte compression et un taux d'erreur de 10^{-9} , qui ne détruit qu'une infime fraction de l'image et ne gêne pas sa vision. La transmission se fait selon les normes DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial) notamment en Europe, ISDB (Integrated Service Digital Broadcasting) au Japon et en Amérique du Sud et ATSC (Advanced Television Systems Committee) en Amérique du Nord. Les deux standards pour le flot de transmission d'un canal de télévision numérique sont aujourd'hui H.262 / MPEG-2 et H.264 / MPEG-4.

Les améliorations incessantes apportées aux codecs devraient permettre dans quelques années de faire passer un canal de télévision sur une bande encore plus restreinte, tout en y ajoutant de nouvelles fonctionnalités.

- **Télévision haute définition.** Demande des transmissions à plus de 500 Mbit/s si aucune compression n'est effectuée. Après compression, on peut descendre à une valeur de l'ordre de 8 Mbit/s. Par exemple sur un canal DVB-T de 24 Mbit/s, il est possible de faire transiter trois canaux de télévision haute définition.

- **Télévision 3D.** Cette nouvelle génération requiert des débits encore plus importants puisqu'elle consiste à transporter plusieurs images pour en obtenir une seule qui donne l'impression d'être en trois dimensions. Après compression, on peut descendre à une valeur de l'ordre de 20 Mbit/s.
- **Vidéoconférence.** Ce terme générique désigne une conférence entre deux ou plusieurs utilisateurs qui s'effectue par le biais de réseaux de télécommunications. On peut aussi prendre comme définition de la vidéoconférence, la très haute qualité. Proche du cinéma, la qualité vidéoconférence requiert des débits considérables de plusieurs dizaines de mégabits par seconde. Compte tenu de ces débits, ce type de canal ne devrait se répandre qu'avec l'arrivée du câblage en fibre optique jusqu'au domicile et dans toutes les entreprises. Un cas particulier, qui semble se développer dans les années 2010, concerne les murs de présence : il s'agit de projeter sur un mur une vidéoconférence de haute qualité avec un son stéréophonique et une transmission en temps réel.

Les câblo-opérateurs se préoccupent en premier lieu de diffuser des images animées de type TV. Les structures de câblage mises en place pour cela permettent de diffuser chez l'utilisateur de nombreux canaux de télévision, qui se comptent aujourd'hui par centaines.

Les applications vidéo vont de la télésurveillance à la vidéo à la demande, ou VoD (Video on Demand), en passant par la messagerie vidéo et le « Home Media Center » domestique pour la diffusion vidéo généralisée à l'échelle d'une maison.

Les réseaux câblés utilisés par les diffuseurs sur la partie terminale du réseau de distribution sont appelés CATV (Community Antenna TeleVision). Le CATV utilise un câble coaxial de 75 Ω , dont la largeur de bande dépasse 1 GHz. On l'utilise aussi comme câble d'antenne de télévision. Il s'agit d'un support unidirectionnel, qui implique d'envoyer le signal vers un centre, lequel le rediffuse à toutes les stations connectées, contrairement à ce qui se passe, par exemple, dans le réseau Ethernet, où le signal est diffusé dans les deux sens du support physique.

Dans un réseau CATV, la diffusion des chaînes de télévision s'effectue facilement du centre vers la périphérie. Pour ajouter des canaux dans le sens inverse, du client vers la tête de réseau, des accès Internet par exemple, on divise la bande passante en deux : une partie pour aller vers la tête de réseau, l'autre desservant les utilisateurs. On parle en ce cas de bande montante et de bande descendante.

Depuis que le prix de revient de la fibre optique et des connecteurs associés est devenu concurrentiel, on l'utilise de plus en plus à la place du câble coaxial. La bande passante de la fibre optique est beaucoup plus importante et permet d'augmenter très fortement le débit des accès Internet.

Les réseaux câblés ont été exploités pendant longtemps en analogique et non en numérique. Les débits sont aujourd'hui suffisants pour y faire transiter des applications multimédias. Cependant, comme nous le verrons, la principale difficulté est de faire transiter plusieurs milliers de canaux montants du terminal vers le réseau sur un canal partagé d'une capacité limitée. Mille clients émettant potentiellement à 1 Mbit/s représentent un débit total de 1 Gbit/s, ce qui est généralement nettement plus que la bande

disponible sur la partie montante. Il faut donc très souvent une technique de partage du canal pour arbitrer les accès montants des utilisateurs.

Dans certains pays, comme les États-Unis, les foyers constituent pour les câblo-opérateurs une porte d'entrée simple vers l'utilisateur final. Le câblage, qui est une des clés de la diffusion généralisée de l'information, a été durant de nombreuses années l'objet de toutes les convoitises des opérateurs de télécommunications. Le succès des techniques xDSL, utilisant le câblage téléphonique, a toutefois limité l'impact des réseaux câblés. Le déploiement de la fibre optique, de la TNT et des réseaux de mobiles 4G pourraient réduire grandement l'intérêt de ces réseaux.

La principale technique utilisée par les câblo-opérateurs pour transporter les canaux de télévision est le multiplexage en fréquence, qui consiste en une partition de la bande passante en sous-bandes. Chaque sous-bande transporte un canal de télévision. Cette solution est illustrée à la figure 1.7.

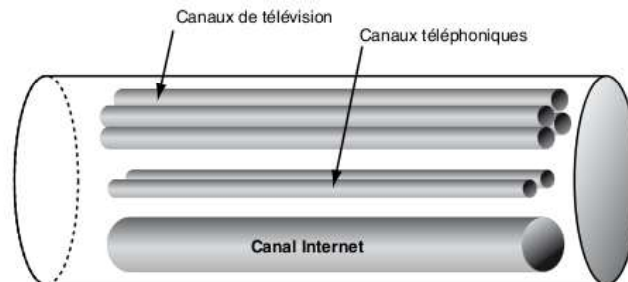


Figure 1.7

Multiplexage en fréquence dans le CATV

Le multiplexage en fréquence d'un grand nombre de sous-bandes présente l'inconvénient de requérir autant de types de récepteurs que de canaux à accéder. Il faut un décodeur pour la télévision, un modem câble pour Internet et un accès téléphonique pour la parole numérique. Les techniques de multiplexage temporel, dans lesquelles le temps est découpé en petites tranches affectées régulièrement aux utilisateurs, sont beaucoup plus puissantes, puisqu'un même émetteur-récepteur permet de recevoir tous les canaux.

En conclusion, la technique employée par les câblo-opérateurs permet une intégration dans le CATV d'un grand nombre d'applications utilisant des sous-bandes différentes, adaptées à différents types de transmissions. Son principal inconvénient vient du multiplexage en fréquence, qui conduit les câblo-opérateurs à utiliser un grand nombre de bandes en parallèle. Ces bandes peuvent être considérées comme des canaux de communication indépendants les uns des autres, de telle sorte qu'il n'y a pas d'intégration des flux : un client peut utiliser en parallèle un canal de télévision, un canal d'accès Internet et un canal pour la téléphonie. Le canal de télévision est connecté à un câblo-opérateur,

le canal d'accès Internet à un opérateur Internet et le canal de téléphonie à un opérateur téléphonique. L'intégration de ces différents réseaux chez un même opérateur est aujourd'hui une réalité que nous étudions tout au long de ce livre.

L'intégration des réseaux

Les sections précédentes ont introduit brièvement les trois grandes catégories de réseaux, informatique, de télécommunications et des câblo-opérateurs, qui se proposent de transporter les données informatiques, la parole téléphonique et la vidéo. Chacun de ces réseaux essaie aujourd'hui de prendre en charge les trois médias simultanément pour tendre vers un réseau intégré. Cette section détaille les caractéristiques d'une telle intégration des réseaux dans un réseau multimédia, ainsi que les contraintes qu'il doit supporter.

Le monde des télécommunications a adopté diverses solutions pour doter ses réseaux de commutation de solutions permettant d'obtenir une qualité de service satisfaisante. La première solution a consisté à utiliser des chemins associés à une classe de service. Les paquets suivant ce chemin étaient traités en priorité dans le commutateur. Cette solution a ensuite évolué vers l'ingénierie de trafic. Au moment de l'ouverture du chemin, le paquet de signalisation note, dans chaque commutateur, les caractéristiques du trafic ayant été négociées entre le client et l'opérateur du réseau. Cette négociation donne naissance à un SLA (Service Level Agreement) que nous retrouverons au chapitre 26, dédié à la gestion de réseau. Grâce à ces informations, les nœuds peuvent décider de laisser passer ou non un paquet de signalisation souhaitant ouvrir un chemin. Il est donc relativement simple de négocier une qualité de service correspondant aux différentes applications des réseaux multimédias.

Les réseaux de routage ont bien plus de difficulté à garantir cette qualité de service puisqu'il ne peut y avoir de réservation de ressources et qu'il n'est pas possible de déterminer à l'avance les routeurs par lesquels doivent passer les paquets d'un même flot. Une première solution à ce problème consiste à surdimensionner le réseau pour que les paquets s'écoulent de façon fluide. Si cette solution était acceptable entre 2000 et 2005 grâce à l'importante capacité de transport développée lors de la « bulle Internet » des années 1999-2000, ce n'est plus le cas aujourd'hui.

Une nouvelle solution a été proposée consistant à introduire une classification des clients et à ne surdimensionner que les clients de plus haute priorité. Cela suppose de discriminer ces clients, soit par le paiement d'un abonnement plus élevé, soit en restreignant le nombre de clients de l'application considérée. La téléphonie sur IP fonctionne grâce à cette solution. Seuls les paquets IP sortant de téléphones IP se voient affecter la priorité la plus haute. En calculant le nombre maximal de voies téléphoniques pouvant s'écouler sur chaque liaison, on peut en déduire la capacité de la ligne pour qu'elle soit vue comme surdimensionnée.

Conclusion

Ce chapitre a introduit les premiers concepts des réseaux. La convergence de ces réseaux provenant de différents horizons, comme l'informatique, les télécommunications et la vidéo, vers un réseau unique est maintenant achevée.

Nous avons également introduit le passage des réseaux transportant les informations sous forme analogique aux réseaux transportant les informations sous forme numérique. Les réseaux numériques se sont développés en proposant plusieurs options, le routage et la commutation, et en utilisant aussi bien des supports physiques terrestres que des transmissions radio.

Aujourd'hui, les réseaux analogiques ont quasiment disparu, sauf pour des applications très spécifiques, comme la téléphonie pour la communication entre un contrôleur aérien et un avion, pour des raisons de fiabilité et de disponibilité. Mais même dans ce cas, le passage au numérique s'effectuera dans quelques années. Les raisons en sont le coût des équipements et la réutilisation simple des composants numériques qui n'utilisent que les deux valeurs, 0 et 1.

Les difficultés à résoudre pour la marche parfaite des réseaux hertziens et terrestres sont notamment la mise à niveau de la sécurité, la gestion du réseau global, le contrôle de la mobilité et l'introduction d'une virtualisation complète.

Cet ouvrage détaille de façon graduelle toutes les solutions envisagées et examine les éléments nécessaires à la construction d'un réseau de bout en bout.