

Introduction

Types de réseaux – PAN, LAN, MAN, WAN – Internet – Modèles OSI et TCP/IP – Standards – Neutralité – Vie privée

Chacun des trois siècles passés a été marqué par des progrès technologiques spectaculaires. Le XVIII^e siècle a été celui des grands systèmes mécaniques issus de la révolution industrielle, le XIX^e a vu apparaître la machine à vapeur et le moteur à explosion ; le XX^e siècle a été l'ère de l'électronique numérique qui a permis la collecte, le traitement et la distribution des informations. Cette dernière période a aussi connu d'autres développements majeurs, notamment le déploiement de réseaux téléphoniques à l'échelle mondiale, l'invention de la radio et de la télévision, l'explosion de l'industrie informatique, le lancement de satellites de communication, et, bien entendu, Internet. Qui peut savoir ce que les prochaines décennies de ce XXI^e siècle vont apporter ?

En raison des rapides progrès technologiques que nous connaissons, ces domaines convergent rapidement ; les distinctions qui semblaient évidentes entre la collecte, le transport, le stockage et le traitement des informations disparaissent progressivement. Une entreprise, si gigantesque soit-elle, peut désormais, le plus simplement du monde, connaître la situation précise de n'importe lequel de ses bureaux quel qu'en soit l'éloignement géographique. Mais à mesure que nos capacités à gérer l'information augmentent, nos besoins en traitements toujours plus sophistiqués croissent aussi.

1.1 Usages des réseaux d'ordinateurs

Bien que plus récente que d'autres industries comme l'automobile ou les transports aériens, l'industrie informatique a accompli des progrès fantastiques en peu de temps. Durant les deux premières décennies, les ordinateurs jouissaient du statut de bijoux technologiques. Ils étaient centralisés, fréquemment placés dans des salles dédiées aux cloisons vitrées au travers desquelles les visiteurs pouvaient les admirer. Une société ou une université de taille moyenne n'en possédait peut-être qu'un ou deux, tandis que les établissements les plus grands en comptaient au plus quelques

dizaines. L'idée qu'une quarantaine d'années plus tard des systèmes de la taille d'un timbre-poste mais beaucoup plus puissants allaient être produits par millions relevait de la science-fiction pure.

Le rapprochement du monde informatique et de celui des télécommunications a profondément influencé la façon dont les systèmes informatiques sont organisés. Le concept de « salle informatique » autrefois dominant – une pièce abritant un gros ordinateur dans laquelle les utilisateurs apportaient leurs travaux à traiter – est aujourd'hui complètement obsolète (même si les centres d'hébergement contenant des centaines de serveurs Internet deviennent courants à l'ère de l'infonuage ou cloud). Le modèle de l'ordinateur unique répondant de façon centralisée à tous les besoins de l'entreprise a été supplanté par un autre dans lequel les traitements sont répartis entre plusieurs machines interconnectées. Ces systèmes sont les **réseaux d'ordinateurs**, et ce livre traite de leur conception et de leur mise en œuvre.

Tout au long de ce livre, nous emploierons le terme de « réseau d'ordinateurs » pour désigner un ensemble d'ordinateurs autonomes interconnectés au moyen d'une seule technologie. Deux ordinateurs sont dits interconnectés s'ils peuvent échanger des informations. La connexion physique n'est pas nécessairement réalisée à l'aide d'un câble en cuivre : il est possible d'employer de la fibre optique, des micro-ondes, des ondes infrarouges ou encore des satellites de communication. Comme nous le verrons plus loin, les réseaux peuvent être de tailles, de formes et de types différents. Ils sont généralement interconnectés pour constituer de plus grands réseaux, l'**Internet** étant l'exemple le plus célèbre d'un réseau de réseaux.

1.1.1 Accès à l'information

Les modalités d'accès aux informations sont variées. Sur Internet, la technique habituelle consiste à utiliser un logiciel navigateur Web qui permet d'afficher le contenu de pages rendues accessibles par des sites Web, et notamment les très populaires sites de réseaux sociaux. Sur un téléphone portable (*smartphone*), il est dorénavant possible de disposer des mêmes possibilités. Tous les sujets imaginables sont à disposition : art, commerce, cuisine, législation, santé, histoire, loisirs, sciences, sports, voyages (et d'autres sujets que la bienséance nous oblige à passer sous silence même s'ils représentent une grosse proportion du trafic Internet).

Les médias d'information ont largement opté pour une présence en ligne, certains ayant même abandonné leur édition papier. L'accès à l'information est devenu de plus en plus personnalisable. Sur certains sites, on peut même indiquer ses domaines d'intérêt, par exemple les scandales politiques, les accidents, la vie des célébrités, les épidémies ou le football. Les petits vendeurs de journaux à la criée ont du souci à se faire pour arrondir leurs fins de mois. En revanche, les producteurs d'information disposent d'une audience qu'ils n'auraient jamais espérée voici encore vingt ans.

Chaque utilisateur peut dorénavant produire une information ou lui servir de relais, mais tout ce qu'il voit a été soigneusement sélectionné à partir d'algorithmes qui se basent sur les comportements mémorisés pour lui et son entourage numérique. La rémunération des producteurs d'information dépend essentiellement de la publicité.

Pour assurer le meilleur impact des annonces et un bon retour sur investissement pour l'annonceur, il est indispensable de connaître le plus précisément possible chaque visiteur. Ces données personnelles sont soigneusement collectées, mais elles risquent d'être utilisées à mauvais escient.

Les librairies numériques et sites académiques proposent dorénavant des versions numériques de tous les contenus, qu'il s'agisse d'études scientifiques ou de littérature. Les organisations professionnelles telles que ACM (*Association for Computing Machinery*) [www.acm.org] ou IEEE (www.computer.org) mettent à disposition leurs revues et comptes rendus de conférences. Un jour, le livre papier aura peut-être disparu au profit des liseuses et des bibliothèques numériques. À chaque époque sa révolution : que l'on songe au bouleversement sociétal que fut l'apparition de l'imprimerie à la fin du Moyen Âge, âge d'or de l'enluminure et du manuscrit.

Sur Internet, l'accès à l'information utilise très généralement le modèle client-serveur, dans lequel une machine cliente demande des informations à une machine serveur qui les détient, comme le montre la figure 1.1.

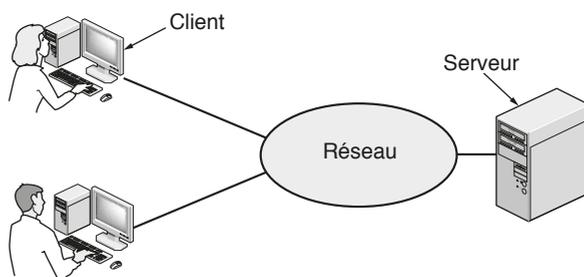


Figure 1.1 • Un réseau avec deux clients et un serveur.

Ce type d'organisation porte le nom de **modèle client-serveur**. Il est largement répandu et sert de base à de nombreuses applications. La réalisation la mieux connue est celle de l'**application Web**, dans laquelle le serveur génère des pages Web à partir de sa base de données, en réponse aux requêtes des clients qui peuvent mettre à jour ladite base. Ce modèle est applicable lorsque le client et le serveur se situent dans le même immeuble (et appartiennent à une même société), mais également lorsqu'ils sont éloignés géographiquement, comme dans le cas d'une personne accédant à une page sur le Web. Dans ce cas, le serveur est le serveur Web distant et le client est l'ordinateur personnel de l'utilisateur. La plupart du temps, le serveur peut prendre en charge simultanément des centaines ou des milliers de clients.

Si nous examinons le modèle client-serveur en détail, nous constatons que deux processus (deux programmes qui s'exécutent) sont impliqués : l'un sur la machine cliente et l'autre sur la machine serveur. La communication prend alors la forme d'un processus client qui envoie un message au processus serveur, puis attend un message en réponse. Quand le processus serveur reçoit la requête du client, il exécute la tâche ou recherche les données demandées, puis il envoie une réponse. La figure 1.2 illustre cet échange de messages.

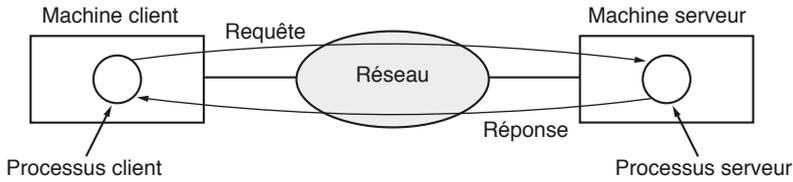


Figure 1.2 • Le modèle client-serveur met en œuvre l'échange de requêtes et de réponses.

Un autre modèle est le **poste à poste** ou **pair-à-pair** (*peer-to-peer*) souvent abrégé en P2P. Dans ce modèle, les utilisateurs forment un groupe informel au sein duquel chacun peut communiquer avec tous les autres, comme le montre la figure 1.3. L'échange se fait en principe sur un pied d'égalité, et il n'existe pas de division en clients et en serveurs.

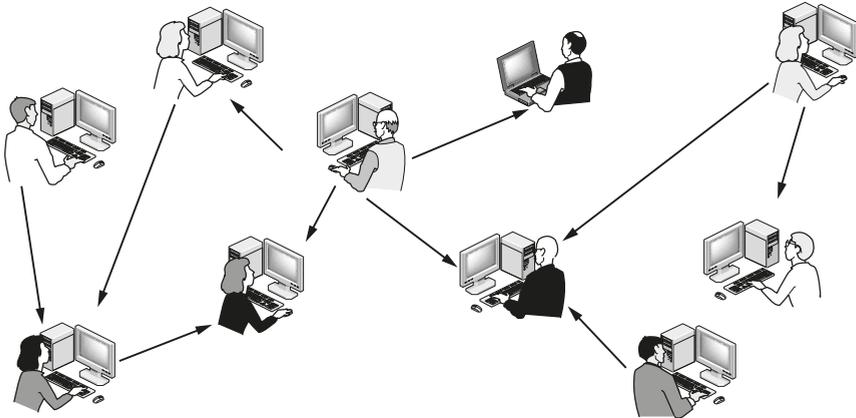


Figure 1.3 • Dans un système pair-à-pair, il n'existe pas de clients ni de serveurs fixes.

Dans la plupart des systèmes pair-à-pair, comme BitTorrent, la base de données centrale disparaît. À la place, chaque utilisateur maintient sa propre base de données localement et fournit une liste des autres personnes du voisinage qui sont membres du système. Un nouvel utilisateur peut ainsi rendre visite à un membre existant pour voir ce qu'il propose et obtenir les noms d'autres membres pour rechercher d'autres contenus et obtenir d'autres noms. Ce processus peut se répéter indéfiniment et permettre d'établir une volumineuse base de données locale. Cette tâche serait fastidieuse pour des humains, mais les ordinateurs y excellent.

La communication pair-à-pair sert souvent à partager de la musique et des vidéos. Elle a connu son apogée aux alentours de l'an 2000 avec un service de partage de musique nommé Napster, qui a été fermé après un retentissant procès relatif au non-respect des droits d'auteur. Il existe dorénavant des applications parfaitement légales de ce modèle. Le partage entre fans de la musique appartenant au domaine public,

l'échange de photos en famille ou le téléchargement de logiciels gratuits sont autant d'exemples d'activités autorisées. En fait, l'une des applications les plus populaires de l'Internet, le courrier électronique, est par essence poste-à-poste. Cette forme de communication est appelée à se développer considérablement dans le futur.

1.1.2 Communications interpersonnelles

Les moyens de communication interpersonnelle représentent en quelque sorte au XXI^e siècle ce que le téléphone représentait au XIX^e. Des millions d'individus dans le monde emploient quotidiennement le courrier électronique, et son utilisation augmente rapidement. Il sert à transporter aussi bien du texte et des images que des données audio et vidéo. Quant aux odeurs, il faudra patienter encore quelque temps.

Aujourd'hui, qui peut encore se passer d'une application de **messagerie instantanée** ? Ce service, qui s'inspire du programme UNIX *talk* utilisé dans les années 1970, permet à deux personnes d'échanger des messages en temps réel. Il existe également des services de messagerie collective, comme **Twitter**, qui permet d'envoyer de courts messages texte (et vidéo) appelés « tweets » (gazouillis) à son cercle d'amis ou au monde entier.

Des applications peuvent également utiliser l'Internet pour transporter des données audio (comme les stations de radio en ligne et les serveurs de flux musicaux audio) et vidéo (comme YouTube et Netflix). Outre qu'elles représentent un moyen peu coûteux d'appeler des amis éloignés, ces applications peuvent procurer des expériences intéressantes, comme le télé-enseignement, qui présente l'avantage de pouvoir suivre un cours à 8 heures du matin sans devoir quitter son lit. À long terme, l'utilisation des réseaux pour améliorer la communication interhumaine sera peut-être plus importante que toutes les autres. Elle pourra même devenir capitale pour les personnes géographiquement isolées, en leur offrant les mêmes services qu'à celles qui vivent au cœur d'une grande ville.

Entre les communications interpersonnelles et l'accès à l'information, on trouve les applications de réseautage social, ou **réseaux sociaux**. Dans ces derniers, le flux d'information est régi par les relations que les personnes déclarent exister entre elles. L'un des sites les plus connus en la matière est **Facebook**. Il permet à ses membres d'actualiser leur profil personnel et de partager les mises à jour avec ceux qu'ils affirment être leurs amis. Dans d'autres applications de réseautage social, il est possible d'être introduit par des amis d'amis, d'envoyer des messages à des amis, comme sur Twitter mentionné précédemment, et bien plus encore.

De façon encore plus informelle, des groupes d'individus peuvent travailler ensemble pour créer des contenus. Un **wiki**, par exemple, est un site Web collaboratif qu'une communauté crée et modifie. Le plus célèbre d'entre eux est **Wikipédia**, une encyclopédie à laquelle chacun peut contribuer, mais il en existe des centaines d'autres.

1.1.3 Commerce électronique

Le commerce électronique ou e-commerce s'est banalisé en une poignée d'années¹. Nombre d'utilisateurs apprécient de faire leurs achats depuis leur domicile en consultant les catalogues en ligne de milliers d'entreprises et en se faisant livrer chez eux sous quelques jours ou quelques heures. Et si le client rencontre des difficultés lors de l'emploi d'un produit après son achat électronique, il peut faire appel à un service d'assistance en ligne.

Le commerce électronique a aussi largement pénétré le secteur des institutions financières. De nombreux clients paient leurs factures, gèrent leurs comptes bancaires et réalisent des investissements par voie électronique en profitant des services des nouvelles banques en ligne et sociétés de technologie financière ou **fintech**.

Un domaine que personne n'avait anticipé est celui des ventes aux enchères de produits d'occasion, qui représentent une véritable industrie. À la différence du commerce électronique traditionnel qui s'appuie sur le modèle client-serveur, la braderie en ligne est du type poste-à-poste, au sens où chaque consommateur peut être simultanément acheteur et vendeur. Le site de vente gère une énorme base de données des produits mis en vente.

Certaines de ces formes de commerce en ligne ont reçu une appellation tirée de l'anglais (où le mot *to* est remplacé par *2*, dont la prononciation est identique). La figure 1.4 présente les plus connues.

Appellation	Modèle métier	Exemple
B2C (<i>Business-to-Consumer</i>)	Entreprise à consommateur	Achat de livres en ligne
B2B (<i>Business-to-Business</i>)	Entreprise à entreprise	Commande de pneumatiques par un constructeur d'automobiles
G2C (<i>Government-to-Consumer</i>)	Gouvernement à consommateur	Déclaration de revenus
C2C (<i>Consumer-to-Consumer</i>)	Consommateur à consommateur	Vente aux enchères de produits d'occasion
P2P (<i>Peer-to-Peer</i>)	Égalitaire	Partage de musique, Skype

Figure 1.4 • Quelques formes de commerce en ligne.

1.1.4 Loisirs et divertissements

Une quatrième catégorie d'applications concerne le divertissement. Elle a fait une énorme percée ces dernières années, avec la distribution en ligne de musique, de programmes de radio et de télévision et de films en haute définition, qui commence à concurrencer les moyens de diffusion traditionnels. Les usagers peuvent trouver, acheter et télécharger des morceaux au format MP3 et des films en qualité DVD et 4K, et les ajouter à leur collection personnelle. Les émissions télévisées atteignent de nombreux foyers *via* des systèmes **IPTV** (*IP Television*), qui s'appuient sur une

1. N.d.T. : Et la pandémie de Covid-19 a encore accéléré l'adoption de ce mode de commerce.

technologie IP au lieu du câble ou de la transmission hertzienne. Des applications de *streaming* (diffusion en flux) permettent aux utilisateurs d'écouter des radios Internet (ou Web radios) ou de visionner leurs séries favorites. Naturellement, tous ces contenus peuvent être distribués dans toute la maison, entre différents équipements audio et vidéo, généralement grâce à un réseau sans fil.

Bientôt, il sera possible d'accéder à n'importe quel film ou programme télévisé jamais produit dans n'importe quel pays. Les nouveaux films pourront devenir interactifs, l'utilisateur étant invité de temps à autre à choisir le cours de l'histoire parmi différents scénarios possibles (par exemple, Macbeth doit-il assassiner Duncan ou attendre son heure ?). Les jeux télévisés en direct pourraient également devenir interactifs et proposer au public de participer, de départager les concurrents, et ainsi de suite.

Le jeu est une autre forme de divertissement. Il existe déjà des jeux de simulation multijoueurs, comme les jeux de rôle dans des donjons virtuels ou les simulateurs de vol où un équipage réalise en temps réel un vol commercial. Les mondes virtuels constituent un environnement persistant, dans lequel des milliers d'utilisateurs peuvent vivre une réalité partagée grâce à des images en 3D.

1.1.5 L'Internet des objets (IdO, IoT)

Notre dernière catégorie est l'**informatique ubiquitaire**, au sein de laquelle les ordinateurs sont omniprésents dans la vie quotidienne. Nombre de foyers sont déjà équipés de systèmes de sécurité, avec des capteurs placés sur leurs portes et fenêtres. Bien d'autres capteurs pourraient être embarqués dans un petit système de gestion domotique, pour contrôler par exemple la consommation d'énergie. Les compteurs d'électricité, de gaz et d'eau peuvent transmettre directement les données sur le réseau, ce qui évite la pollution liée aux déplacements des releveurs de compteurs. De même, les détecteurs de fumée peuvent contacter les pompiers au lieu d'émettre un bruit strident (qui ne sert pas à grand-chose quand la maison est vide). Les réfrigérateurs connectés peuvent vous envoyer leur part de votre liste de courses et même passer la commande pour vous. Cette révolution de l'Internet des objets aboutira à ce que tout équipement traitant des données numériques soit relié au réseau planétaire.

Les équipements électroniques grand public sont de plus en plus connectés à des réseaux. Par exemple, certains appareils photo haut de gamme disposent déjà de fonctionnalités sans fil et les utilisent pour envoyer des images et les afficher sur un écran proche. Les photographes sportifs professionnels peuvent également envoyer à leur agence leurs photos en temps réel, d'abord en sans-fil vers un point d'accès, puis sur l'Internet. Tout appareil relié au réseau électrique peut dorénavant s'en servir comme moyen de connexion à Internet grâce à la technologie du courant porteur. Bien d'autres objets peuvent capter et communiquer des données. Par exemple, votre douche peut enregistrer votre consommation d'eau, vous donner un feedback visuel pendant que vous vous savonnez et envoyer un rapport à une application domotique écologique quand vous avez fini pour vous permettre d'économiser sur votre facture d'eau.

1.2 Types de réseaux informatiques

Nous allons décrire quelques catégories choisies parmi les nombreux types de réseaux informatiques existants. Nous verrons d'abord les réseaux d'accès à Internet pour le grand public, puis ceux utilisés dans les centres de calcul, ensuite ceux qui relient les centres de calcul aux réseaux d'accès Internet des particuliers et enfin les réseaux utilisés dans les entreprises ou les institutions telles que les universités et les centres de recherche.

1.2.1 Réseaux d'accès à haut débit

En 1977, Ken Olsen était le président de Digital Equipment Corporation, le deuxième constructeur d'ordinateurs au monde à l'époque (après IBM). Lorsqu'on lui a demandé pourquoi Digital n'investissait pas franchement sur le marché de l'ordinateur individuel, il a répondu qu'il ne voyait aucun intérêt pour le particulier à disposer d'un ordinateur chez lui. L'histoire lui a donné tort, et Digital n'existe plus. À l'origine, on achetait un ordinateur pour le traitement de texte et les jeux. Plus récemment, la principale raison d'acquérir un ordinateur domestique a sans doute été l'accès à l'Internet. De nos jours, de nombreux produits électroniques destinés au grand public, comme les décodeurs TV, les consoles de jeux et les radioréveils, contiennent des ordinateurs embarqués, et les réseaux informatiques, surtout les réseaux sans fil et les réseaux domestiques, sont largement utilisés pour le divertissement, notamment pour la création et la diffusion de musique, de photos et de vidéos.

L'accès à l'Internet fournit aux utilisateurs domestiques la **connectivité** à des ordinateurs distants. Comme les utilisateurs professionnels, ils peuvent consulter des informations, communiquer avec d'autres personnes et acheter des biens et des services en ligne. Le principal avantage provient maintenant de la possibilité de se connecter sans sortir de chez soi. Bob Metcalfe, l'inventeur d'Ethernet, estimait que la valeur d'un réseau est proportionnelle au carré du nombre de ses utilisateurs, parce que c'est approximativement le nombre de connexions différentes possibles. Connue sous le nom de « loi de Metcalfe », cette hypothèse aide à expliquer en quoi la fantastique réussite de l'Internet est due à sa taille.

Le taux de couverture des réseaux d'accès filaires dans les pays développés s'approche du taux de couverture maximal. Ces réseaux se basent soit sur la paire de fils torsadés du réseau téléphonique en cuivre, soit sur les câbles coaxiaux de la télévision par câble, soit sur la fibre optique. Les débits possibles ne cessent d'augmenter, les particuliers ayant dorénavant aisément accès à une vitesse de l'ordre du gigabit par seconde (Gbit/s) jusqu'au domicile. En revanche, dans les pays qui ne disposaient quasiment pas d'infrastructure téléphonique, l'accès à Internet s'appuie principalement sur un réseau de téléphonie mobile.

1.2.2 Réseaux d'accès sans fil et mobilité

Les équipements mobiles comme les ordinateurs ultraportables, les téléphones intelligents (*smartphones*) et les tablettes numériques représentent l'un des segments à plus forte croissance de l'industrie informatique. Leurs ventes ont déjà dépassé celles des ordinateurs de bureau. Quel est leur intérêt ? En déplacement, les utilisateurs veulent pouvoir lire et envoyer des courriers électroniques et des messages instantanés, visionner des films, télécharger de la musique, jouer ou tout simplement surfer sur le Web à la recherche d'informations – autrement dit faire tout ce qu'ils font chez eux et au bureau. Et bien entendu, ils veulent pouvoir le faire depuis n'importe quel endroit sur terre, en mer ou dans les airs.

La **connectivité** à l'Internet permet nombre de ces usages nomades. Puisqu'une connexion filaire est impossible à bord d'un véhicule, d'un bateau ou d'un avion, les réseaux sans fil suscitent un très vif intérêt. Les réseaux cellulaires offerts par les compagnies téléphoniques sont un exemple familier de ce type de réseau qui nous fournit une couverture pour les téléphones mobiles. Les **hotspots** sans fil, basés sur la norme 802.11, sont un autre type de réseau sans fil pour les équipements nomades. Ils ont surgi un peu partout et forment désormais un patchwork qui couvre les cafés, les hôtels, les aéroports, les écoles, les trains et les avions. Toute personne équipée d'un ordinateur portable et d'un modem sans fil peut se connecter à l'Internet *via* le point d'accès *hotspot* comme si elle était connectée à un réseau filaire.

Les réseaux sans fil sont aussi très précieux pour les flottes de camions ou de taxis et pour les livreurs ou les réparateurs qui gardent ainsi le contact avec leur entreprise. Dans certaines villes, les voitures sont équipées d'un dispositif doté d'un écran sur lequel s'affichent les lieux de prise en charge et de destination lorsqu'une nouvelle demande est transmise par un centre d'appels. Un signal sonore avertit le chauffeur de l'arrivée de la demande et le premier qui appuie sur un bouton de l'écran obtient la course.

L'adoption à large échelle par le grand public d'un téléphone cellulaire intelligent (alias *smartphone*) a également généré une révolution dans les transports. Une économie du partage est ainsi apparue, ce qui a permis d'organiser des déplacements entre particuliers avec le covoiturage et l'explosion des services de transport à la demande tels ceux proposés par Uber ou Lyft.

Les réseaux sans fil jouent aussi un rôle important pour l'armée. Pour pouvoir partir en « mission » n'importe où dans un bref délai, il serait déraisonnable de compter sur l'infrastructure de réseau locale, et il est préférable d'employer la sienne.

Bien que le réseau sans fil et l'informatique mobile soient souvent associés, il s'agit de deux choses différentes, comme le montre le tableau de la figure 1.5. Nous voyons qu'il existe une différence entre les **accès sans fil fixes** et les **accès sans fil mobiles**. Même des ordinateurs portables sont parfois interconnectés au moyen d'un câble. Par exemple, un voyageur reliant son *notebook* à la prise du réseau filaire de sa chambre d'hôtel bénéficie de la mobilité sans recourir à un réseau sans fil. La généralisation des accès Wi-Fi gratuits rend cette situation de plus en plus rare, même si un réseau câblé sera toujours plus performant.

Sans fil	Mobile	Applications
Non	Non	Ordinateur personnel de bureau
Oui	Oui	Ordinateur portable utilisé dans une chambre d'hôtel
Oui	Non	Réseau dans des immeubles anciens sans câblage
Oui	Oui	Terminal de poche pour l'inventaire de magasin

Figure 1.5 • Relations entre réseaux sans fil et informatique mobile.

Inversement, certains ordinateurs sans fil ne sont pas mobiles. À la maison, et dans les bureaux ou les hôtels qui ne sont pas câblés de façon appropriée, il peut être plus pratique de connecter des ordinateurs de bureau ou des lecteurs multimédias par une liaison sans fil que de tirer des câbles. L'installation d'un réseau sans fil ne demande guère plus que d'acquérir un petit boîtier avec l'électronique associée, de débiller le tout et de le mettre en place. Cette solution est de loin plus économique que le recours à des ouvriers pour passer des câbles.

Enfin, il existe des applications sans fil réellement mobiles, comme celles servant à faire les inventaires de stocks depuis un terminal de poche. Dans les grands aéroports, les sociétés de location de véhicules équipent les employés affectés à la réception des véhicules d'ordinateurs portables communiquant sans fil. Sur le parking, les codes-barres ou les puces RFID des véhicules rendus sont scannés, puis leur équipement mobile, qui dispose d'une imprimante intégrée, appelle l'ordinateur central, récupère les données du contrat et imprime la facture à côté du véhicule.

La clé du succès des applications pour appareils mobiles sans fil est évidemment le téléphone cellulaire. Son utilisation en tant que terminal de navigation Internet a créé le marché des applications pour mobiles. Les téléphones modernes, par exemple les iPhone d'Apple ou les Galaxy de Samsung, sont simultanément des téléphones cellulaires et de véritables ordinateurs portables de poche. Ils savent automatiquement se connecter à un réseau Wi-Fi lorsqu'ils détectent un signal suffisant et choisir à tout moment la connexion la moins coûteuse. Il y a encore quelques années, le service d'échange de courts messages texte ou **SMS** (*Short Message Service*) était extrêmement populaire. Il a donné naissance à toute une culture de l'abréviation et a constitué une source de revenus extraordinaire pour les opérateurs de télécommunications. De nos jours, son usage a fortement diminué, car les SMS sont remplacés par des applications dédiées de discussion telles que WhatsApp, Signal ou Facebook Messenger. D'autres équipements électroniques grand public peuvent aussi utiliser les réseaux cellulaires et les *hotspots* pour rester connectés à des ordinateurs distants. Les lecteurs peuvent télécharger sur une liseuse le dernier livre qu'ils ont acheté, la nouvelle édition d'un magazine ou le journal du jour partout où ils vont, et les panneaux numériques peuvent actualiser leur affichage à tout moment.

Les téléphones mobiles connaissent leur position, étant donné qu'ils sont équipés d'un récepteur **GPS** (*Global Positioning System*). En l'absence de signal GPS depuis les satellites, le téléphone peut également réaliser une triangulation entre plusieurs points d'accès à un réseau Wi-Fi. Certains services sont intentionnellement dépendants de la position géographique. D'ailleurs, certaines applications ne fonctionnent

que si le positionnement est possible. Les cartes et le guidage d'itinéraire sont des exemples évidents, et le GPS de votre téléphone ou de votre voiture a probablement une idée plus précise que vous de l'endroit où vous êtes. Il en va de même si vous recherchez une librairie ou un restaurant chinois à proximité, ou encore si vous voulez la météo locale. D'autres services peuvent enregistrer votre position, par exemple pour annoter des photos et des vidéos avec le lieu où elles ont été prises. Ces annotations sont connues sous le nom de balises de géolocalisation (*geotags*).

Un domaine dans lequel on utilise de plus en plus le téléphone mobile est le **commerce mobile (m-commerce)**. Au lieu d'utiliser de la monnaie ou une carte bancaire, l'utilisateur envoie un SMS au distributeur automatique pour payer un café, un ticket de cinéma ou un autre petit article. Le paiement est ensuite imputé sur la facture du téléphone mobile. S'il est équipé de la technologie de **communication en champ proche** ou **NFC (Near Field Communication)**, le mobile peut faire office de carte RFID et communiquer avec un lecteur proche pour régler un achat. Les forces motrices derrière ce phénomène sont les constructeurs d'équipements nomades et les opérateurs de télécommunications, qui déploient des efforts considérables pour obtenir une part du gâteau. Du point de vue du commerçant, ce système lui évite la majeure partie des frais liés à l'emploi des cartes de crédit, qui peuvent représenter un pourcentage important. Bien entendu, la médaille a un revers : les clients d'un magasin peuvent utiliser leur lecteur de codes-barres ou de radio-étiquettes pour connaître les tarifs des concurrents avant d'acheter ou obtenir une liste détaillée des autres points de vente proposant le même produit avec son prix.

Un gros avantage dont peut profiter le commerce mobile est que les utilisateurs de portables sont habitués à payer pour tout (à la différence des utilisateurs de l'Internet qui s'attendent au « tout-gratuit »). Un site Web soulèverait un tollé général s'il facturait un coût supplémentaire pour autoriser le client à payer par carte de crédit, alors que l'application d'un coût supplémentaire par un opérateur pour permettre le paiement par téléphone portable dans un magasin sera probablement considérée comme naturelle. L'avenir nous le dira.

Il ne fait aucun doute que les usages des ordinateurs mobiles et sans fil se développeront rapidement à mesure que les ordinateurs se miniaturiseront, et probablement en des façons que personne ne peut encore prévoir. Voyons rapidement quelques possibilités. Les **réseaux de capteurs** sans fil sont constitués de nœuds qui recueillent et transmettent des informations sur l'état du monde physique. Ces nœuds peuvent faire partie d'objets familiers, comme un téléphone ou une voiture, ou bien être de petits dispositifs autonomes. Par exemple, votre voiture pourrait collecter des données sur sa position, sa vitesse, les vibrations qu'elle émet et son efficacité énergétique, puis les envoyer à une base de données. Celle-ci pourrait aider à détecter des nids-de-poule, trouver des itinéraires pour contourner les embouteillages et vous dire si vous êtes un « goinfre en essence » par rapport aux autres conducteurs empruntant la même portion de route.

Les réseaux de capteurs sont en train de révolutionner la science en fournissant une profusion de données sur des comportements qu'il était auparavant impossible d'observer. On a pu par exemple suivre des migrations de zèbres en plaçant un petit

capteur sur chaque animal. Des chercheurs ont réussi à embarquer un ordinateur sans fil dans un cube de 1 mm. Il est ainsi possible de suivre à la trace des oiseaux, des rongeurs et des insectes, si petits soient-ils.

Même des utilisations banales peuvent être significatives, parce qu'elles emploient des données auparavant indisponibles. Par exemple, les parcmètres peuvent accepter des paiements par carte de débit ou de crédit sur une liaison sans fil, et indiquer s'ils sont utilisés ou non. Cela permettrait aux conducteurs de télécharger un plan de quartier actualisé en temps réel pour trouver une place plus facilement. Bien entendu, une fois le temps de stationnement écoulé, le parcmètre pourrait également vérifier la présence d'une voiture (en captant le signal qui en provient) et avertir les autorités de l'expiration du délai. Une étude a montré que les villes des États-Unis pourraient récolter de l'ordre de 10 milliards de dollars d'amendes de stationnement en plus par an.

1.2.3 Réseaux de fournisseurs de contenus (CDN)

De plus en plus de services offerts sur Internet sont dorénavant hébergés dans des fermes de serveurs que l'on appelle des infocentres ou cloud. Le réseau est ainsi centré sur les données. Un infocentre typique regroupe des centaines ou des milliers de serveurs empilés dans des armoires dans un bâtiment climatisé aux dimensions gigantesques. Ces centres de calcul et de stockage répondent à la demande croissante de l'informatique en nuage. Ils sont conçus pour permettre des échanges très rapides de données entre les différents serveurs du centre, ainsi qu'entre le centre et le reste d'Internet.

Pour la plupart des applications dont on profite de nos jours, qu'il s'agisse d'un site Web ou d'un éditeur de texte en mode Web, les données sont stockées dans le nuage. Les propriétaires des infocentres doivent relever sans cesse des défis en matière de montée en charge et d'économie d'énergie. Une des mesures de débit qu'ils surveillent en permanence est la bande passante interne, ou *cross-section* qui est le débit de données disponible entre n'importe quelle paire de serveurs du réseau. Les premiers réseaux d'infocentre adoptaient une topologie en arbre, constituée de trois couches de commutateurs : accès, agrégation et noyau. Cette approche simpliste ne permettait pas de répondre aisément à une montée en charge et réagissait mal aux avaries.

De nombreux services offerts sur Internet proposent au visiteur de recevoir des contenus où qu'il se trouve dans le monde. La solution technique généralement adoptée est un réseau de diffusion de contenus **CDN** (*Content Delivery Network*). Il s'agit d'un nombre important de serveurs informatiques disséminés géographiquement de telle sorte qu'il y a au moins un serveur proche de clients susceptibles d'en réclamer du contenu. Les grands acteurs d'Internet que sont Google, Facebook ou Netflix disposent de leur propre réseau CDN. D'autres entreprises, et notamment Akamai et Cloudflare, proposent des services d'hébergement sur leur CDN à toutes les sociétés pour lesquelles l'investissement demandé est hors de propos.

Les contenus qui sont réclamés par les utilisateurs, qu'il s'agisse de fichiers statiques ou de flux vidéo, sont stockés en plusieurs exemplaires dans différents lieux géographiques du CDN. Lorsque l'utilisateur demande un contenu, c'est le CDN qui décide depuis quel serveur il va répondre à sa demande. La décision tient compte de la distance physique par rapport au client, de la charge instantanée sur les différents serveurs et de la bande passante disponible sur le réseau.

1.2.4 Réseaux de transit

Internet est au départ une fédération de réseaux indépendants. Le réseau de votre fournisseur d'accès n'est pas le même que celui sur lequel se trouve le contenu du site Web que vous visitez. En général, les données et les applications sont localisées dans un réseau de diffusion de contenus ou un infocentre, et vous y accédez en passant par le réseau d'un fournisseur d'accès, un **FAI** (en France, par exemple, Orange, Free, Red, etc.). Les contenus vont donc transiter de l'infocentre vers le réseau d'accès pour aboutir dans votre équipement.

Lorsque le fournisseur du contenu et votre fournisseur d'accès local ne sont pas connectés directement, un réseau de transit est nécessaire pour faire le lien entre eux. Les réseaux de transit facturent le FAI et le fournisseur de contenus pour faire transiter leur trafic d'un bout à l'autre. À partir du moment où ces deux acteurs échangent un volume suffisant de données, ils peuvent trouver plus rentable de s'interconnecter directement. De telles interconnexions directes sont ainsi mises en place entre les principaux fournisseurs d'accès et de contenus, tels que Google ou Netflix. Les deux partenaires d'une telle interconnexion doivent instaurer et entretenir les infrastructures réseau d'interconnexion directe, avec des équipements installés en différents points du territoire.

Les réseaux de transit sont souvent désignés en tant que **dorsales**, parce que leur rôle est de faire circuler du trafic entre des points d'extrémité. Il y a encore quelques années, l'exploitation d'un réseau de transit était extrêmement rentable parce que tous les autres réseaux devaient payer pour être connectés au reste d'Internet. Néanmoins, deux tendances sont apparues depuis une dizaine d'années. La première est la consolidation des contenus entre les mains de quelques fournisseurs de contenus majeurs, qui ont ainsi proposé des services d'hébergement dans l'infonuage et mis en place de vastes réseaux de diffusion. La seconde tendance correspond à l'agrandissement du périmètre des capacités des FAI : au départ, ils se limitaient à une activité régionale ou nationale, mais un certain nombre d'entre eux se sont développés à l'international, augmentant leurs points de présence géographique et donc les interconnexions directes aux bases de données. La taille et les capacités de négociation des fournisseurs d'accès et des fournisseurs de contenus ont augmenté au point que les plus grands des réseaux se sont rendus indépendants des réseaux de transit pour transmettre leurs contenus. Ils privilégient ainsi dès que possible l'interconnexion directe et n'ont recours aux réseaux de transit qu'en cas d'avarie (chemins de secours).

1.2.5 Réseaux d'entreprise

La plupart des organisations (entreprises, administrations et universités) sont équipées de nombreux ordinateurs. Chaque salarié en reçoit un pour effectuer ses tâches. Ces machines sont presque toujours connectées à un réseau pour partager des données, communiquer et bénéficier de services de traitement de données.

Le partage de ressources permet d'exploiter les équipements et les données où qu'ils se trouvent, à partir de sa connexion au réseau. C'est le cas du partage d'une imprimante haut de gamme entre plusieurs salariés, solution plus sensée que d'équiper chaque poste d'une imprimante personnelle plus limitée, d'autant que cela simplifie le maintien en conditions opérationnelles des imprimantes en réduisant le nombre de lieux d'intervention.

Il est encore plus essentiel de pouvoir partager les données. Une entreprise possède un capital d'informations (stock, comptabilité, achats, ventes, etc.). Une banque ne survit pas à plus de quelques minutes d'interruption de ses serveurs. Une usine moderne pilotée par informatique s'arrête au bout de quelques secondes d'avarie. Même une agence de voyages ou un cabinet d'avocats avec trois salariés sont devenus totalement dépendants de leur informatique.

Dans les petites et moyennes entreprises, les ordinateurs peuvent être installés dans une salle dédiée, mais dans les plus grandes, l'infrastructure informatique est répartie sur plusieurs sites, éventuellement sur plusieurs continents. Un commercial situé à New York a besoin d'accéder à la base d'inventaire de la région Asie-Pacifique située à Singapour. Cela est possible en implantant des réseaux privés virtuels VPN (*Virtual Private Networks*) qui interconnectent les réseaux des sites géographiques pour former un seul réseau logique. Que le client et le serveur soient distants de 15 000 km ne doit pas constituer un handicap. Il s'agit de se libérer de la « tyrannie de la géographie ».

Pour simplifier, on peut considérer le système d'information (SI) d'une entreprise comme un groupe de bases de données et un ensemble de salariés qui ont besoin d'y accéder à distance. Les données sont hébergées sur de puissantes machines appelées serveurs, normalement maintenues par des administrateurs réseau et système. Les salariés disposent de machines plus légères pour exploiter les données et utiliser les applications, par exemple un tableur. (Parfois, nous nommons client la personne qui utilise le système et parfois nous désignons ainsi la machine avec laquelle elle l'utilise. Le contexte vous permettra de faire la différence.) Client et serveur sont mis en relation par le réseau (voir figure 1.1). Notez que, sur cette figure, nous avons symbolisé le réseau comme un simple ovale et c'est ainsi que nous le schématisons quand nous en parlons de façon théorique.

Le deuxième objectif d'un réseau d'entreprise ne concerne ni les machines, ni l'information, mais les personnes. Un tel réseau constitue un formidable outil de communication entre les salariés. Toutes les entreprises disposent de nos jours d'une messagerie électronique dont les salariés se servent au quotidien. Les discussions autour de la machine à café tournent souvent autour du nombre de courriels que chacun a trouvés dans sa boîte de réception en revenant de congés. Les PDG ont compris qu'ils pouvaient informer tout le personnel en un seul clic.

Les appels téléphoniques entre salariés peuvent utiliser le réseau informatique grâce à la technologie **VoIP** (*Voice over IP*) qui exploite la technologie Internet. Le microphone et le haut-parleur ou le casque de l'interlocuteur peuvent prendre la forme de périphériques VoIP ou de composants de l'ordinateur du salarié. Les entreprises s'autorisent ainsi de notables économies sur leurs factures de télécommunications.

Les réseaux informatiques permettent encore d'autres formes de communication. Les salariés peuvent participer à des visioréunions, ce qui évite le coût et les pertes de temps des déplacements. Le partage de machine permet de résoudre à distance le problème d'un utilisateur ou de travailler à plusieurs sur le même fichier. Chaque modification du document est visible en temps réel par tous les participants. Il est devenu possible de faire travailler ensemble des personnes physiquement éloignées. Des emplois plus ambitieux encore apparaissent, notamment la télé médecine (diagnostic et intervention à distance). Une course est lancée entre moyens de transport physiques et moyens de communication : les vainqueurs rendront les autres obsolètes.

Le troisième objectif des entreprises est l'informatisation de leurs relations avec les fournisseurs et les clients. Dans de nombreux secteurs, tels que les compagnies aériennes et les librairies, les clients ont plébiscité l'achat depuis leur domicile. La palette de produits et de services des fournisseurs leur est proposée sur les sites et les commandes peuvent être passées et payées directement. Même entre professionnels, les achats de matières premières et de composants pour les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et de l'informatique s'opèrent à distance grâce aux réseaux, ce qui réduit les besoins de stockage.

1.3 Technologies réseau locales et globales

On distingue plusieurs catégories de réseaux en fonction de leur portée et du nombre de personnes ainsi interconnectées. Découvrons-les en partant des plus locaux.

1.3.1 Réseaux personnels (PAN)

Un **réseau personnel**, ou **PAN** (*Personal Area Network*), permet à des équipements situés dans un périmètre de quelques mètres de communiquer entre eux. Un exemple courant est celui du **réseau sans fil** Bluetooth qui relie l'unité centrale d'un ordinateur à ses périphériques, un casque sans fil à votre téléphone portable ou ce dernier au système audio de votre véhicule.

Tout ordinateur de bureau requiert un moniteur, un clavier, une souris et éventuellement une imprimante. À l'origine, il fallait interconnecter tous ces équipements par des câbles, et ce même si nombre de nouveaux utilisateurs avaient du mal à trouver la bonne connectique et à la brancher au bon endroit (malgré des couleurs ou des formats différents). Souvent, les fournisseurs proposaient de ce fait l'installation par un technicien. Plusieurs sociétés se sont heureusement concertées pour définir les normes d'un réseau sans fil à courte portée, nommé **Bluetooth**, permettant de connecter des périphériques sans avoir besoin de câbles. Il suffit de poser le nouvel

équipement sur son bureau, de le mettre sous tension et de procéder à son appairage. Cette facilité est devenue indispensable.

Sous leur forme la plus simple, les réseaux Bluetooth s'appuient sur le paradigme maître-esclave de la figure 1.6, où le PC est normalement le maître ; la souris, le clavier, etc. sont quant à eux les esclaves. Le maître indique aux esclaves les adresses à utiliser, le moment où ils peuvent diffuser, pendant combien de temps ils peuvent émettre, les fréquences qu'ils peuvent employer, et ainsi de suite. Nous détaillerons le Bluetooth au chapitre 4, avec d'autres technologies de communication à courte portée permettant elles aussi de construire des PAN.

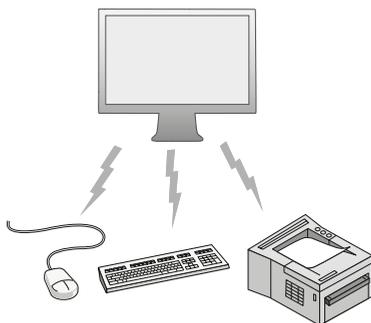


Figure 1.6 • Configuration d'un réseau personnel Bluetooth.

1.3.2 Réseaux locaux (LAN)

Un **réseau local**, ou LAN (*Local Area Network*), est un réseau privé qui fonctionne dans un seul bâtiment, comme une maison, un immeuble de bureaux ou une usine (ou encore le voisinage immédiat). Il sert à relier des ordinateurs personnels et des équipements électroniques grand public (par exemple, des imprimantes) pour leur permettre de partager des ressources et d'échanger des informations.

Les LAN sans fil sont très répandus de nos jours, surtout dans les habitations, les immeubles de bureaux anciens, les cafétérias et autres lieux où l'installation de câbles poserait trop de problèmes. Dans ces systèmes, chaque ordinateur dispose d'un modem radio et d'une antenne, au moyen desquels il communique avec les autres ordinateurs. Dans la plupart des cas, chaque machine communique avec un équipement installé dans le plafond, comme le montre la figure 1.7(a). Cet équipement, appelé **point d'accès (AP, Access Point)**, **routeur sans fil** ou **station de base**, relaie les paquets entre les ordinateurs sans fil, et entre ceux-ci et l'Internet. Être un point d'accès est un peu comme être le chouchou de la classe : tout le monde veut vous parler. Toutefois, si les machines sont suffisamment proches, elles peuvent communiquer directement dans une configuration poste-à-poste.

Une configuration particulière consiste pour différents équipements dotés de capacités réseau de servir de relais de paquets les uns pour les autres, ce qui donne une configuration de **réseau maillé**. Parfois, les relais sont les points d'extrémité, mais

en général on prévoit de dédier certains nœuds à la fonction de relais du trafic. Ces réseaux coopératifs ont beaucoup de succès dans les pays en voie de développement par exemple, parce que la mise en place d'une infrastructure de télécommunications filaire y serait trop onéreuse. On trouve également ce genre de réseau maillé de plus en plus chez les particuliers, notamment dans les grandes demeures.

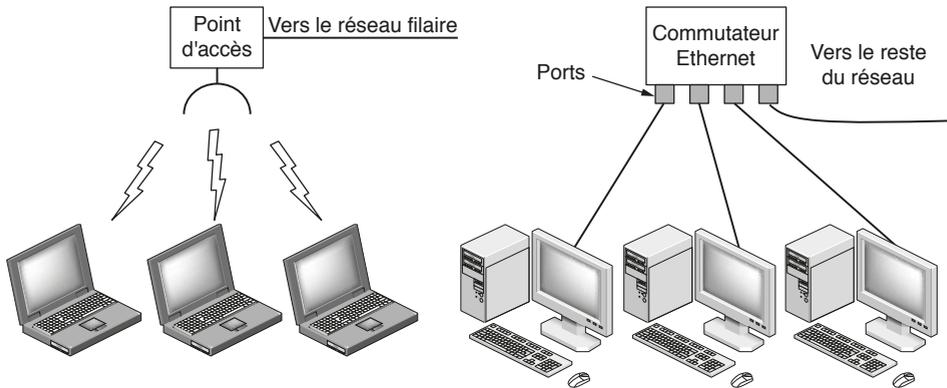


Figure 1.7 • LAN sans fil et filaires. (a) 802.11. (b) Ethernet commuté

Pour les réseaux locaux sans fil, la norme porte la référence **IEEE 802.11**, mais elle est plus connue sous le nom de **Wi-Fi**. Elle assure des débits jusqu'à 7 Gbit/s (variante 802.11ad). (Dans ce livre, nous respecterons la coutume qui veut que l'on mesure le débit d'une ligne en mégabits par seconde, où 1 Mbit vaut un million de bits, et en gigabits par seconde, où 1 Gbit vaut un milliard de bits.) Les puissances de 2 ne sont utilisées que pour les espaces mémoire de stockage de données (mémoire vive ou disques) : 1 Mo d'espace correspond à 2^{20} , soit 1 048 576 octets. Nous étudierons la norme 802.11 au chapitre 4.

Les LAN filaires font appel à différentes technologies de transmission. La plupart d'entre elles utilisent du fil de cuivre, mais certaines sont à base de fibre optique. Les LAN sont limités en taille, ce qui veut dire que le temps de transmission le plus long est également limité et connu d'avance. Connaître ces restrictions est utile pour la conception des protocoles réseau. Généralement, les LAN filaires offrent des débits de 100 Mbit/s à 40 Gbit/s et un faible délai de latence (de l'ordre de quelques microsecondes ou moins).

La latence (c'est-à-dire le retard naturel d'acheminement) des réseaux locaux câblés ne dépasse jamais quelques dizaines de millisecondes, et reste souvent bien inférieure ; en outre, les erreurs de transmission sont très rares. Il faut reconnaître que les progrès dans les réseaux sans fil ont réduit cet avantage, mais il sera toujours plus facile et plus sûr de transmettre un signal par une fibre optique que par des ondes hertziennes.

La topologie de nombreux LAN filaires est construite à partir de liens point-à-point. La norme la plus courante pour les LAN filaires est de loin IEEE 802.3, plus connue sous le nom d'**Ethernet**. La figure 1.7(b) représente un exemple de topologie pour un réseau

Ethernet commuté. Chaque ordinateur « parle » le protocole Ethernet et est connecté à un **commutateur** (d'où son nom) par un lien point-à-point. Un commutateur possède plusieurs **ports**, chacun d'eux pouvant être connecté à un ordinateur. Sa tâche consiste à relayer les paquets entre les ordinateurs auxquels il est relié, en se basant sur l'adresse présente dans chaque paquet pour déterminer auquel l'envoyer.

Pour construire des LAN de plus grande envergure, il est possible de connecter des commutateurs en utilisant leurs ports. Que se passe-t-il si on les connecte en boucle ? Le réseau continuera-t-il à fonctionner ? Nous verrons comment ce processus fonctionne au chapitre 4. Heureusement, un ingénieur s'est penché sur la question et, de nos jours, quasiment tous les commutateurs sont dotés d'un algorithme d'anti-rebouclage.

On peut également subdiviser un grand LAN physique en deux LAN logiques plus petits. Vous vous demandez peut-être quel est l'intérêt de l'opération. Il arrive que l'agencement de l'équipement réseau ne corresponde pas à la structure de l'organisation. Par exemple, il se peut que les ordinateurs du bureau d'études et de la comptabilité se trouvent sur le même LAN physique parce qu'ils résident dans la même aile du bâtiment, mais que le système soit plus facile à gérer si chaque département dispose de son propre réseau logique, autrement dit un **réseau virtuel** ou **VLAN** (*Virtual LAN*). Dans ce cas, chaque port est marqué d'une « couleur » différente, par exemple vert pour le bureau d'études et rouge pour la comptabilité. Le commutateur transmet alors les paquets de telle sorte que les ordinateurs reliés aux ports verts soient séparés des ordinateurs reliés aux ports rouges. Les paquets de diffusion envoyés sur un port rouge ne seront pas reçus sur un port vert, exactement comme s'il s'agissait de deux réseaux différents. Nous aborderons les VLAN à la fin du chapitre 4.

Il existe également d'autres topologies de LAN filaires. En fait, l'Ethernet commuté est une version moderne de l'Ethernet d'origine, qui diffusait tous les paquets sur un seul câble linéaire : une seule machine pouvait émettre à la fois, et un mécanisme d'arbitrage servait à résoudre les conflits. Il s'appuyait sur un algorithme simple : les ordinateurs pouvaient émettre chaque fois que le câble était inoccupé. Si deux paquets ou plus entraient en collision, chaque ordinateur se contentait d'attendre un laps de temps aléatoire et réessayait plus tard.

Pour plus de clarté, nous qualifierons cette version d'**Ethernet classique** et, comme vous vous en doutez, nous la verrons plus en détail au chapitre 4.

Les réseaux à diffusion (tant filaires que sans fil) se répartissent aussi en systèmes statiques et systèmes dynamiques, selon la façon dont le canal est alloué. Une méthode d'allocation statique type consiste à diviser le temps en intervalles discrets et à utiliser un algorithme de tourniquet (*round-robin*) : chaque machine émet et reçoit à tour de rôle lorsque la tranche de temps qui lui a été accordée se présente. Ce fonctionnement gâche toutefois la capacité du canal lorsqu'une machine n'a rien à transmettre ou recevoir, raison pour laquelle la plupart des systèmes tentent d'allouer le canal dynamiquement (c'est-à-dire à la demande).

L'allocation dynamique d'un canal partagé se fait de façon centralisée ou décentralisée. Dans le premier cas, il n'existe qu'une seule entité, par exemple la station de

base d'un réseau cellulaire, qui détermine la prochaine machine autorisée à émettre. Pour cela, elle peut accepter des requêtes et un algorithme interne guide son choix. Dans le second cas, aucune entité n'assure l'arbitrage et chaque machine doit décider elle-même du moment à émettre. Cette technique ne mène pas au chaos comme on pourrait le penser de prime abord ; de nombreux algorithmes, que nous étudierons plus loin, permettent de l'éviter, à condition que toutes les machines interconnectées se conforment aux règles.

1.3.3 Réseaux locaux domestiques

Il n'est pas inutile d'étudier de façon indépendante les réseaux locaux installés au domicile des particuliers. Ils se distinguent des réseaux locaux d'entreprise ou d'espace public par le fait qu'ils sont destinés à accueillir des équipements très divers, tout en restant faciles à gérer, fiables et sécurisés, même entre les mains de personnes sans compétences techniques.

Il y a encore quelques années, un réseau local domestique se limitait à quelques ordinateurs reliés par un réseau filaire ou Wi-Fi. De nos jours, ce type de réseau doit pouvoir accueillir des téléphones, des imprimantes Wi-Fi, des thermostats connectés, une alarme, des détecteurs de fumée, des ampoules d'éclairage, une caméra de télésurveillance, un téléviseur, une chaîne stéréo, un réfrigérateur, etc. De plus en plus d'appareils électroménagers et d'électronique de loisirs sont dorénavant proposés avec une capacité de connexion à Internet, ce qui constitue le monde de l'Internet des objets. Dorénavant, toutes sortes d'équipements électroniques, et notamment des capteurs, peuvent devenir accessibles et télécommandables. Cette multiplication des candidats à l'accès pose par conséquent de nouveaux défis au niveau de la conception, de l'administration et de la sécurisation du réseau. La télésurveillance et le télécontrôle d'un domicile deviennent de plus en plus courants, qu'il s'agisse d'en surveiller l'accès ou d'offrir une téléprésence à une personne hospitalisée à domicile ou une personne âgée. Nombreux sont les descendants prêts à équiper le domicile de leurs parents pour s'assurer qu'ils sont en sécurité chez eux.

Un réseau domestique doit tout d'abord être facile à installer et à administrer. Il fut un temps où les routeurs sans fil étaient rapportés chez le commerçant par des clients déçus : ils avaient cru qu'il suffisait de relier le boîtier au secteur et au réseau pour que tout fonctionne et avaient passé de nombreux appels au support technique pour finalement abandonner. Les équipements doivent être fiables et pouvoir fonctionner sans obliger l'utilisateur à comprendre le contenu d'un manuel d'installation de 50 pages.

La deuxième particularité des réseaux domestiques concerne la sécurité et la fiabilité, parce que toute faiblesse dans ces domaines peut avoir un effet catastrophique sur la sécurité des données ou la santé des personnes. Perdre une série de fichiers à cause d'un virus introduit par mégarde avec un pourriel est une chose ; constater qu'un cambrioleur a désactivé votre alarme depuis son téléphone puis vidé tranquillement votre maison en est une autre. On ne compte plus les exemples de catastrophes causées par des équipements connectés mal sécurisés ou dysfonctionnels. Un simple script malicieux peut entraîner la destruction d'un système de chauffage central en provoquant l'éclatement des tuyauteries par le gel. Les équipements insuffisamment sécurisés

permettent à un pirate d'observer les comportements des habitants du domicile. Même lorsque les communications sont cryptées, le simple fait de pouvoir déduire le type d'équipement qui communique, les volumes et les heures des échanges peut dévoiler des détails importants au sujet des modes de vie.

Troisième particularité, les réseaux domestiques évoluent au cours du temps en fonction de l'acquisition de nouveaux équipements électroniques à connecter. Alors qu'un réseau local d'entreprise est généralement homogène car planifié, on trouve dans un réseau domestique une foule de technologies diverses. Les utilisateurs s'attendent néanmoins à ce que tous ces équipements sachent cohabiter (on voudra par exemple que l'assistant vocal d'un fournisseur sache contrôler l'éclairage d'un autre fournisseur). Une fois installés, ces différents équipements vont rester en place pendant de longues années. Les batailles de standards et autres conflits d'interfaces deviennent dès lors rédhitoires : si vous préconisez à vos clients de s'équiper d'appareils avec une interface IEEE 1394 FireWire avant de leur annoncer quelques années plus tard qu'il faut utiliser uniquement les interfaces USB 3.0, si au niveau du Wi-Fi, vous communiquez de même des informations contradictoires (faut-il adopter la norme 802.11.n, la 802.11ac, ou plutôt la 802.11ax ?), cette cacophonie fera fuir plus d'un client potentiel.

Enfin, dans l'électronique grand public, les marges sont réduites car les appareils sont fabriqués en recherchant l'économie. Au moment d'acquérir un cadre photo électronique, plus d'une personne s'orientera vers un des modèles les moins onéreux. Cette pression sur les prix rend encore plus difficile le respect des objectifs de facilité d'emploi, de sécurité intrinsèque et de compatibilité. Les fabricants comme les consommateurs doivent redoubler de motivation pour que la conformité aux standards soit garantie.

De nos jours, les réseaux domestiques optent généralement pour les technologies sans fil, aussi bien dans l'immobilier neuf qu'en rénovation. La multiplication des équipements connectés rend inenvisageable l'implantation d'une multitude de prises réseau dans toutes les pièces. Il faut cependant se souvenir que la dépendance à un réseau hertzien entraîne des limitations de performances et des défis de sécurité. Plus les particuliers connectent d'équipements différents au réseau, plus ils saturent les possibilités de leur réseau sans fil, qui devient le véritable goulet d'étranglement. Lorsqu'ils constatent que les performances de leur réseau local s'effondrent, nombreux sont les abonnés qui vont se plaindre auprès de leur fournisseur d'accès, ce que ce dernier n'apprécie nullement puisqu'il n'en est pas la cause.

Par ailleurs, les ondes radio parviennent plus ou moins à traverser les cloisons ; dans la bande de fréquences 2,4 Ghz, cela reste correct, mais ça l'est moins dans la nouvelle bande des 5 MHz. La sécurité des réseaux sans fil a plutôt bien progressé en une dizaine d'années, mais ces réseaux restent des points d'entrée privilégiés par les attaquants. Certains éléments du trafic, notamment les adresses matérielles et les mesures de volume, circulent en clair. Nous verrons dans le chapitre 8 comment bien profiter des possibilités de chiffrement pour renforcer la sécurité ; cela dit, les utilisateurs inexpérimentés ont des difficultés à mettre en place ces protections.

Une troisième solution, qui peut être intéressante, consiste à exploiter les réseaux existants. Le **courant porteur en ligne**, ou **CPL**², permet aux appareils qui se connectent au secteur de diffuser des informations dans toute la maison. Certes, il faut brancher le téléviseur, mais l'on obtient la connectivité à l'Internet en même temps. Le problème réside dans la façon de transporter des signaux électriques et des données en même temps. Le fait qu'ils utilisent des bandes de fréquences différentes est une partie de la réponse.

1.3.4 Réseaux métropolitains (MAN)

Un **réseau métropolitain**, ou **MAN** (*Metropolitan Area Network*), couvre une ville. L'exemple le plus connu de MAN est le réseau de télévision par câble que l'on trouve dans nombre d'agglomérations. Celui-ci a évolué à partir de l'ancien système d'antenne collective qui était utilisé dans les zones souffrant d'une mauvaise réception : on plaçait une grosse antenne en haut d'une colline voisine pour conduire ensuite le signal par câble jusqu'au domicile des abonnés.

Il s'agissait au départ de systèmes *ad hoc* dont la conception ne répondait qu'à des besoins locaux. Lorsque les entreprises se sont attaquées au marché, elles ont obtenu des administrations locales des contrats leur permettant de câbler des villes entières. L'étape suivante a été la programmation d'émissions de télévision, et même des chaînes entières expressément conçues pour le câble. Celles-ci étaient souvent très spécialisées, ne diffusant que des actualités, des émissions sportives, des recettes de cuisine, des conseils en jardinage, etc. Toutefois, lors de son apparition à la fin des années 1990, le système ne servait qu'à la réception des signaux de télévision.

Lorsque l'Internet a attiré une audience de masse, les câblo-opérateurs ont commencé à se rendre compte qu'avec peu de changements ils pourraient offrir un service d'accès à l'Internet bidirectionnel dans certaines parties inutilisées du spectre. Le système de télévision a alors commencé à se transformer en réseau métropolitain. En première approximation, on peut dire qu'un MAN ressemble à l'illustration de la figure 1.8. On y voit à la fois des signaux de télévision et le flux Internet qui transitent par la **tête de réseau** pour être distribués aux différentes habitations. Nous reviendrons en détail sur ce sujet au chapitre 2.

Toutefois, le réseau de télévision par câble n'est pas le seul réseau métropolitain. Les récents développements de l'accès à haut débit sans fil à l'Internet ont entraîné l'apparition d'un autre MAN, avec la norme IEEE 802.16, plus connue sous le nom de **WiMAX**. Ce standard ne semble cependant pas rencontrer le succès. Nous passerons également en revue d'autres technologies sans fil, tels que le LTE (*Long Term Evolution*).

2. N.d.T. : Les personnes électrosensibles ne pourront pas s'équiper d'un réseau sans fil, et la solution à courant porteur en ligne CPL ne leur conviendra peut-être pas non plus, car le câblage du réseau électrique n'est pas blindé, ce qui lui fait émettre des ondes radio.