

## Les réseaux d'accès terrestres

---

La boucle locale, aussi appelée réseau de distribution, ou réseau d'accès, est une des parties les plus importantes du réseau d'un opérateur qui distribue de l'information à des utilisateurs. Elle constitue son capital de base en même temps que son lien direct avec le client

Le coût global de mise en place et de maintenance d'un tel réseau est énorme. Il faut en règle générale compter entre 500 et 3 000 euros par utilisateur pour mettre en place cette interface. Ce coût comprend l'infrastructure, le câble et les éléments extrémité de traitement du signal mais ne tient pas compte du terminal. Pour déterminer l'investissement de base d'un opérateur, il suffit de multiplier ce coût par le nombre d'utilisateurs raccordés.

La boucle locale correspond à la desserte de l'utilisateur. Ce sont les derniers mètres ou kilomètres avant d'atteindre le poste client. Il existe des solutions extrêmement variées pour la réaliser. La solution la plus répandue passe par l'utilisation d'un modem xDSL, qui permet le passage de plusieurs mégabits par seconde sur les paires métalliques de la boucle locale. La capacité dépend essentiellement de la distance entre l'équipement terminal et le raccordement au réseau de l'opérateur, qui s'effectue au niveau du DSLAM (Data Subscriber Line Access Module).

La valeur cible pour l'accès au multimédia par la boucle locale augmente chaque année avec l'apparition de nouveaux services demandant chaque fois des débits plus importants. Parmi ces services, le P2P, la télévision, la vidéo à la demande, les murs de présence, etc. Le progrès des codages et des techniques de compression est pourtant un facteur de limitation de l'augmentation des débits par une compression plus forte. Une vidéo de qualité télévision demande un débit de l'ordre de 512 Kbit/s. Quant à la parole sous forme numérique, elle ne demande plus que quelques kilobits par seconde.

## La fibre optique

Une première solution pour mettre en place une boucle locale puissante consiste à recâbler complètement le réseau de distribution en fibre optique. Cette technique, dite FITL (Fiber In-The-Loop), donne naissance à plusieurs techniques en fonction de l'emplacement de l'extrémité de la fibre optique. La solution la plus classique est celle qui dessert directement le domicile de l'utilisateur. Le câblage utilisé dans la plupart des pays la solution FTTH (Fiber to the Home), qui permet un débit de 50 Mbit/s jusqu'à plusieurs centaines de mégabits par seconde.

La boucle locale optique se présente sous plusieurs formes. Elle peut simplement être une étoile optique : à partir d'une tête de réseau, chaque client dispose d'une fibre optique pour lui tout seul. Dans ce cas, il faut des chemins de câbles importants pour poser toutes les fibres simultanément. Cette solution a l'avantage évident d'apporter le plus haut débit possible à l'utilisateur.

Une seconde solution normalisée par l'UIT-T consiste à multiplexer plusieurs utilisateurs sur la même fibre optique. Elle prend la forme illustrée à la figure 9.1. Sa topologie est un arbre optique passif, ou PON (Passive Optical Network). La tête de réseau se trouve derrière l'OLT (Optical Line Termination). L'autre extrémité, l'ONU (Optical Network Unit), dessert directement le domicile de l'utilisateur ou peut être poursuivi par un réseau métallique faisant la jonction entre l'extrémité de la fibre optique et l'utilisateur.

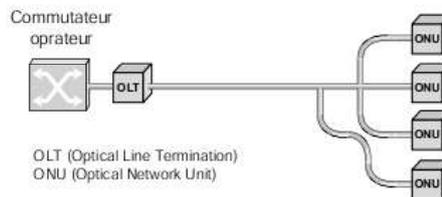


Figure 9.1

*Boucle locale optique de type PON*

Il est à noter que les étoiles optiques passives diffusent les signaux dans toutes les directions à l'exception du port d'entrée. Cette propriété est particulièrement intéressante puisque, si un utilisateur n'utilise pas son accès ou qu'il l'utilise peu, son débit peut être attribué aux autres utilisateurs. Si un seul utilisateur est connecté sur l'arrivée de la fibre, il possède donc l'ensemble du débit. Comme ces réseaux PON utilisent des débits de 1, 2,5 et 10 Gbit/s, on mesure aisément l'augmentation potentielle des débits sur la boucle locale.

En règle générale, une terminaison OLT dessert 48 clients, ce qui donne une moyenne approximative de 50 Mbit/s par utilisateur pour un réseau PON à 2,5 Gbit/s, avec des pointes à la vitesse maximale du support optique. Il convient cependant d'observer que la gestion du multipoint ne permet pas d'atteindre réellement le débit maximal, mais plutôt un débit estimé à la moitié de la valeur maximale.

Ces nouvelles capacités permettent d'exploiter de nouveaux services, comme le P2P (peer-to-peer) avec de nombreuses connexions simultanées, la vidéo de très grande qualité, comme la télévision haute définition, ou les murs de présence utilisant un son et une image animée de très haute qualité.

La mise en place d'un câblage optique est acceptable dans les zones urbaines disposant de conduits mis en place par les précédents câblages. Le coût d'une prise va d'environ 1 000 euros jusqu'à des valeurs de plus de 10 000 euros si du génie civil est nécessaire. Il est possible d'en réduire le coût en ne câblant pas la portion allant jusqu'à la prise terminale de l'utilisateur. Il faut pour cela déterminer le point jusqu'où le câblage doit être posé. Plusieurs solutions s'offrent pour cela à l'opérateur :

- **FTTC (Fiber to the Curb)**. On câble jusqu'à un point assez proche de l'immeuble ou de la maison qui doit être desservi, le reste du câblage étant effectué par l'utilisateur final.
- **FTTN (Fiber to the Node)**. On câble jusqu'à un répartiteur dans l'immeuble lui-même.
- **FTTH (Fiber to the Home)**. On câble jusqu'à la porte de l'utilisateur.
- **FTTT (Fiber to the Terminal)**. On câble jusqu'à la prise de l'utilisateur, à côté de son terminal.

Les technologies associées aux PON sont de type ATM, Ethernet ou Gigabit (UIT-T), ce qui donne naissance aux APON, EPON et GPON. La première permet de mettre en place des FSAN (Full Service Access Network). Dans la solution Ethernet, chaque trame émise est envoyée en diffusion comme sur un réseau Ethernet partagé. La troisième solution met en œuvre les technologies de transmission définies par l'UIT-T au niveau physique.

### APON (ATM Over PON)

Sur le réseau optique passif (PON), il est possible de faire transiter des cellules ATM suivant la technique développée par le groupe de travail FSAN (Full Service Access Network). Cette solution a ensuite été normalisée dans la recommandation G.983 de l'UIT-T. Les deux extrémités de l'arbre optique s'appellent OLT (Optical Line Termination) et ONU (Optical Network Unit). Pour des raisons de déperdition d'énergie, il n'est pas possible de dépasser une cinquantaine de branches sur le tronç.

La figure 9.2 illustre l'architecture d'un réseau optique passif.

Un « superPON » a également été défini, connectant jusqu'à 2 048 ONU sur un même OLT. Dans ce cas, le débit montant est de 2,5 Gbit/s. Sur les réseaux d'accès en fibre optique mis en place par les opérateurs, c'est le protocole ATM qui a été retenu au début de cette technologie. Le système a pris alors le nom d'APON (ATM Over PON).

Dans le sens descendant, les cellules ATM sont émises de façon classique, en « *cell-based* ». Une cellule OAM (Operations And Maintenance) est émise toutes les 26 cellules utilisateur pour gérer le flot. Dans le sens montant, une réservation est nécessaire. Elle s'effectue à l'intérieur des trames FSAN divisées en tranches de 56 octets comportant une cellule et 3 octets de supervision. Au centre de la trame, une tranche particulière de 56 octets est destinée à la réservation d'une tranche de temps.

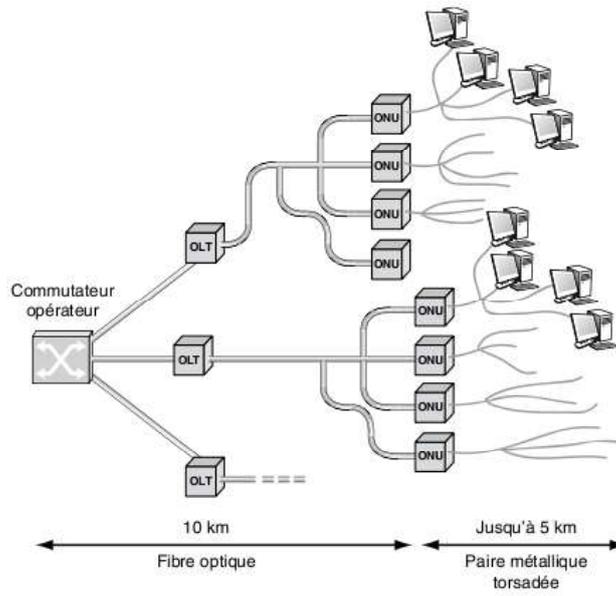


Figure 9.2  
Architecture d'un PON

La figure 9.3 illustre ces zones de données.

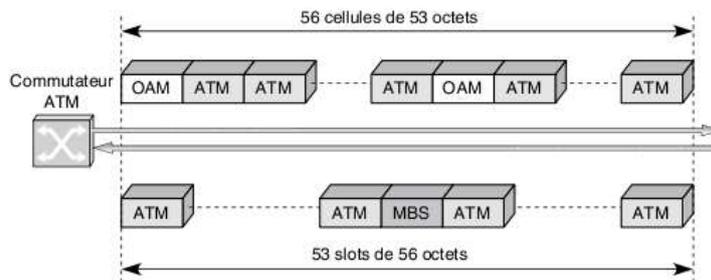


Figure 9.3  
Structure de la zone de données de la trame FSAN

### EPON (Ethernet Passive Optical Network)

Lorsque les trames qui sont émises sur le PON sont de type Ethernet, on parle d'EPON. Les caractéristiques de ce réseau sont identiques à celles des autres PON : diffusion sur l'ensemble du réseau, où seule la station indiquée dans la trame Ethernet peut récupérer l'information véhiculée. Cette solution a été développée par le groupe de travail EFM (Ethernet in the First Mile) de l'IEEE. L'objectif était de remplacer la technologie ATM, très coûteuse à mettre en œuvre sur une technologie multipoint, par la technologie Ethernet.

Dans la technologie EPON, la trame provenant de l'OLT est diffusée vers l'ensemble des ONU (64 au maximum). L'ONU qui reconnaît son adresse récupère la trame Ethernet, dont la taille peut atteindre une longueur de 1 518 octets. Dans le sens montant, les trames Ethernet sont émises suivant une technologie TDM (Time Division Multiplexing) la solution classique utilisée dans Ethernet, CSMA/CD, étant inadaptée aux vitesses des EPON. Le multiplexage dans le sens descendant s'exerce sur des slots de longueur constante de telle sorte que les trames Ethernet doivent être divisées en segments de longueur constante, à l'exception de la dernière partie, qui peut être inférieure à la longueur du slot.

Une synchronisation est indispensable pour qu'il n'y ait pas de collision entre les slots. Cette synchronisation s'effectue toutes les 2 ms, correspondant à la longueur de la trame physique qui comporte l'ensemble des slots des ONU.

Le niveau physique utilise deux ou trois longueurs d'onde. Avec deux longueurs d'onde, il est possible d'utiliser les canaux montants et descendants. La longueur du réseau dans ce cas atteint une vingtaine de kilomètres avec 32 étoiles passives. Avec trois longueurs d'onde, il est possible d'ajouter une voie descendante pour diffuser des canaux de télévision.

La qualité de service peut être obtenue en introduisant une priorité en utilisant, comme nous le verrons au chapitre 13, dédié à Ethernet, une zone indiquant la priorité de la trame.

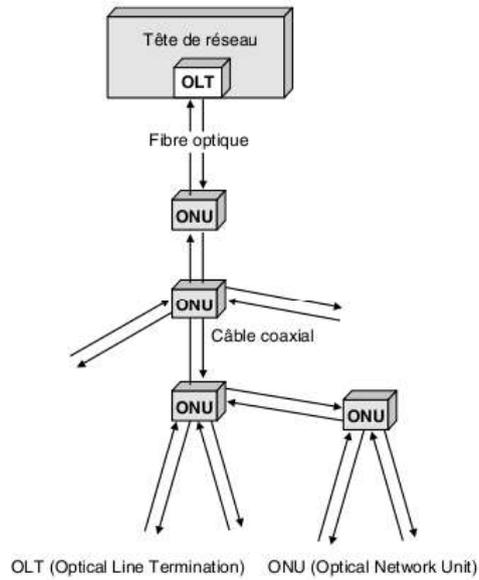
### GPON (Giga Passive Optical Network)

Les GPON ont pour objectif d'augmenter encore les débits pour suivre les progrès technologiques et atteindre 10 puis 40 Gbit/s. Ces solutions proviennent d'une normalisation de l'UIT-T (G.984.x) et des progrès de la fibre optique, comme nous le verrons au chapitre 12. La trame est toujours une trame Ethernet. La portée entre l'OLT et l'ONU est de 10 km pouvant atteindre 20 km.

### Les réseaux câblés (CATV)

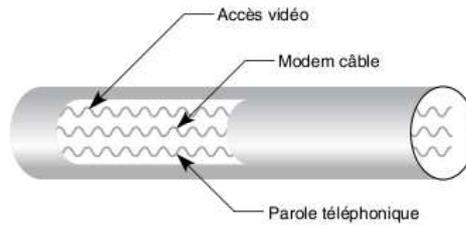
Une autre solution pour obtenir un réseau de distribution à haut débit consiste à utiliser le câblage des câblo-opérateurs, lorsqu'il existe. Ce câblage a pendant longtemps été constitué de câble TV, dont la bande passante dépasse facilement les 800 MHz. Ce câblage est appelé CATV (Community Access Television ou encore Community Antenna Television).

Aujourd'hui, cette infrastructure est légèrement modifiée par la mise en place de systèmes HFC (Hybrid Fiber/Coax), qui associent une partie en fibre optique entre la tête de réseau et le début de la desserte par le CATV. Cette topologie est illustrée à la figure 9.4.



**Figure 9.4**  
*Topologie HFC*

La technologie utilisée sur le CATV est de type multiplexage en fréquence. Sur la bande passante globale, une division en sous-canaux indépendants les uns des autres est réalisée, comme illustré à la figure 9.5.



**Figure 9.5**  
*Multiplexage en fréquence dans un CATV*

Cette solution présente de nombreux avantages, mais aussi quelques défauts majeurs. Son avantage principal réside dans la possibilité d'optimiser ce qui est transmis dans les différents canaux, puisque chaque canal est indépendant des autres canaux. Le multimédia est facilement supporté en affectant un média par sous-bande, chaque sous-bande ayant la possibilité d'être optimisée. Il suffit pour cela de conserver les informations analogiques ou de les numériser.

Les canaux de télévision transitent dans des sous-bandes distinctes. Une sous-bande spécifique peut être dédiée à une connexion de parole téléphonique et une autre sous-bande à la connexion Internet. Cet accès au réseau Internet demande l'utilisation d'un modem câble, qui permet d'accéder à la sous-bande connectée à Internet. Ce type de modem requiert une fréquence déterminée, correspondant à la sous-bande choisie pour la connexion Internet. Son débit peut atteindre, grâce à une bande passante importante, plusieurs dizaines de mégabits par seconde.

La distribution de la bande passante entre les différentes sous-bandes est illustrée à la figure 9.6. La bande des 50-550 MHz est réservée aux canaux de télévision. Chaque canal est aujourd'hui numérique et utilise en général la technique DVB-C (Digital Video Broadcasting – Cable) spécifique aux réseaux câblés. Cette norme DVB-C n'est pas compatible avec le standard DVB-T utilisé dans la télévision numérique terrestre. Il faut donc que les téléviseurs soient équipés de tuners intégrés bi-normes.

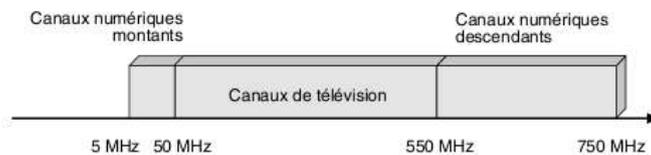


Figure 9.6

*Distribution du spectre à l'intérieur d'un CATV*

La bande des 5-50 MHz correspond aux canaux allant de l'utilisateur à la tête de réseau. La bande des 50-550 MHz part de la tête de réseau pour desservir le terminal utilisateur. Elle peut être utilisée à la fois pour la parole téléphonique et les connexions Internet.

La faiblesse de cette technique vient de ce que le multiplexage en fréquence n'utilise pas au mieux la bande passante et ne permet pas réellement l'intégration des différents services qui transitent dans le CATV. Un multiplexage temporel apporterait une meilleure utilisation de la bande passante disponible et intégrerait dans un seul composant l'accès à l'ensemble des informations au point d'accès. Un transfert de paquets représenterait également une solution adaptée, à condition de modifier complètement les composants extrémité.

En résumé, on peut réaliser une application multimédia sur le câble coaxial des câblo-opérateurs mais en étant obligé de considérer le transport des médias sur des bandes parallèles et non sur une bande unique.

HFC (Hybrid Fiber/Coax) est une autre solution, qui consiste à utiliser de la fibre optique pour permettre au réseau de transporter jusqu'à une distance peu éloignée de l'utilisateur des communications haut débit, en étant relayé par du câble coaxial jusqu'à la prise utilisateur. Grâce à sa capacité très importante, la fibre optique permet de véhiculer autant de canaux qu'il y a d'utilisateurs à atteindre, ce dont est incapable le CATV dès que le nombre d'utilisateurs devient important. Pour ce dernier, il faut trouver une solution de multiplexage des voies montantes vers le cœur de chaîne pour arriver à faire transiter l'ensemble des demandes des utilisateurs sur le réseau. Ce problème est illustré à la figure 9.7.

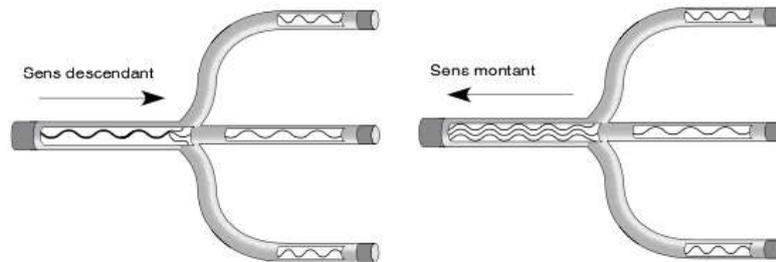


Figure 9.7

*Multiplexage des voies montantes dans la boucle locale en CATV*

Supposons qu'un canal associé à la connexion Internet ait un débit de 34 Mbit/s, ce qui est aujourd'hui le cas standard. Si, sur un arbre CATV, 10 000 prises sont connectées et actives, le débit total sur la voie descendante et sur la voie montante représente 3,4 Kbit/s par utilisateur. Pour offrir un meilleur débit, il faut réaliser un multiplexage statistique afin de récupérer la bande passante non utilisée par certains utilisateurs. Cependant, s'il y a trop d'utilisateurs simultanés, le débit devient insuffisant.

Les normes suivantes ont été proposées comme techniques d'accès pour permettre un multiplexage temporel des utilisateurs sur une bande commune :

- MCNS-DOCSIS (Multimedia Cable Network System-Data Over Cable Service Interoperability Specification), qui est devenu le standard de base.
- IEEE 802.14, qui utilise une technologie ATM en cours de disparition au profit de DOCSIS.
- DVB-DAVIC (Digital Video Broadcasting-Digital Audio Visual Council), qui provient d'un groupement d'industriels de la vidéo.

La norme DOCSIS divise le temps en slots, numérotés entre 1 et 4 096. Les standards disponibles, DOCSIS 1.0, 1.2, 2.0 et 3.0, utilisent des tables d'allocation de slots qui indiquent qui a le droit de transmettre dans un slot. Jusqu'à 14 slots peuvent être utilisés simultanément pour une même communication. Les slots avec accès aléatoire, que l'on appelle slots de contention, permettent aux stations d'effectuer leur réservation. L'accès

aléatoire n'est pas vraiment aléatoire, puisqu'il utilise l'algorithme en arbre BEB (Binary Exponential Backoff) pour résoudre les collisions.

La différence entre les standards réside dans la prise en charge de la qualité de service, qui n'est garantie qu'à partir de la version 1.2. Cette qualité de service est totalement compatible avec le modèle DiffServ, qui consiste à marquer le champ de qualité de service de chaque paquet d'une valeur correspondant à son niveau de priorité.

## Les paires métalliques

### La boucle locale métallique

Les paires métalliques sont très fortement utilisées sur la boucle locale, principalement pour l'accès au réseau téléphonique. Lorsque l'accès se fait en commutation de circuits, ce qui représente aujourd'hui un cas qui diminue de plus en plus, avec une disparition totale vers 2020, on peut utiliser une paire en full-duplex. Il est évidemment possible d'émettre des données binaires en utilisant un modem. La vitesse peut atteindre en ce cas quelques dizaines de kilobits par seconde.

Comme la bande passante de la téléphonie est faible, on n'a pas besoin d'un médium physique de bonne qualité. C'est la raison pour laquelle la paire métallique utilisée pour la distribution téléphonique, avec son diamètre de 0,4 mm, est plutôt de qualité médiocre. De plus, la distribution de la téléphonie depuis les locaux de l'opérateur s'effectue souvent par le biais de câbles de 50 paires, qui sont assez mal protégés et peuvent être la source de nombreux problèmes de distorsion de phase, de diaphonie, etc. Cela complique le passage d'une bande passante importante permettant d'obtenir les débits proposés par les modems ADSL.

## Les accès xDSL

Les modems xDSL permettent d'utiliser les paires métalliques du réseau d'accès pour réaliser une boucle locale à haut débit. Le débit dépend fortement de la qualité du câble utilisé et de la distance à parcourir. Plusieurs catégories de modems xDSL sont commercialisées, la lettre *x* permettant de les différencier.

Les modems ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) sont les plus répandus. Leurs vitesses sont dissymétriques, plus lentes entre le terminal et le réseau que dans l'autre sens. En règle générale, le sens montant est au moins quatre fois moins rapide que le sens descendant. Les vitesses sur le sens descendant peuvent atteindre 28 Mbit/s pour une distance courte de l'ordre du kilomètre et de 1 Mbit/s pour une distance de 5 km. Le modem ADSL utilise une modulation d'amplitude quadratique, c'est-à-dire que 16 bits sont transportés à chaque signal. Avec une rapidité de modulation de 340 kilobauds et une atténuation de l'ordre d'une trentaine de décibels, on atteint plus de 5 Mbit/s.

Devant le succès rencontré par la technique ADSL, des dérivés en ont été développés, notamment la technique consistant à faire varier le débit sur le câble, qui a donné

naissance au RADSL (Rate Adaptive DSL). Pour les hauts débits, les solutions HDSL (High bit rate DSL) et VDSL (Very high bit rate DSL) peuvent être exploitées avec succès si le câblage le permet. Les mesures effectuées chez les opérateurs montrent que les débits deviennent de plus en plus symétriques depuis l'apparition des applications peer-to-peer (P2P), les stations des utilisateurs client devenant des serveurs. Les techniques SDSL (Symmetric DSL) vont donc devenir de plus en plus courantes.

### Le modem ADSL

La technologie ADSL a été normalisée par l'UIT-T sous la recommandation G.992.1. Une extension a été apportée dans la recommandation G.992.3 déterminant l'ADSL2. Des extensions permettant l'amélioration de l'ADSL2 sont adoptées pour allonger la distance entre le client et le DSLAM. Ces améliorations ont permis l'adoption de l'ADSL2+ ou LDSL (Long-reach DSL) ou encore READSL (Range Extended ADSL).

Deux techniques sont utilisées pour augmenter le débit sur une communication xDSL : le full-duplex, qui est assuré sur une même paire grâce à l'annulation d'écho, et l'utilisation d'un code spécifique, 2B1Q.

Les modems ADSL offrent une bande montante de 4 à 100 kHz, qui est utilisée pour des débits de 0,64 Mbit/s. La bande descendante utilise une bande comprise entre 100 kHz et 1,1 MHz, qui permet d'atteindre le débit de 8,2 Mbit/s. La parole analogique, entre 0 et 4 kHz, passe en parallèle des données utilisant le modem.

Les codes en ligne des modems ADSL reposent soit sur la modulation CAP (Carrierless Amplitude and Phase), soit sur la norme DMT (Discrete MultiTone), de l'ANSI (American National Standards Institute) et de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). La méthode DMT consiste en l'utilisation de 256 canaux de 4 kHz, chaque canal permettant l'émission de 15 bits par hertz au maximum.

La figure 9.8 illustre la partie du spectre utilisée par les modems ADSL.

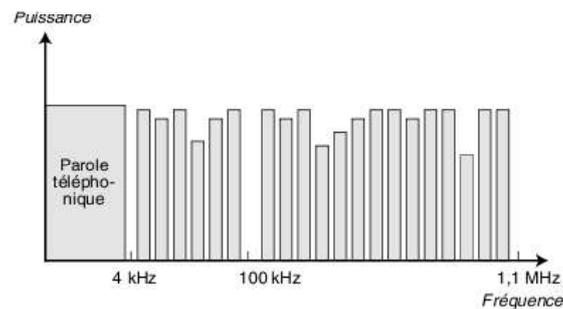


Figure 9.8

Partie du spectre utilisée par l'ADSL

Le spectre est donc découpé en trois parties, une entre 0 et 4 kHz, pour faire passer la parole téléphonique qui continue à être acheminée en parallèle des données, une entre 4 et 100 kHz, pour la voie montante allant du terminal vers le réseau, et une entre 100 kHz et 1,1 MHz pour la voie descendante allant du réseau au terminal.

La partie montante du spectre est divisée en bandes de 4,3 kHz, et plus exactement en 20 sous-bandes de 4,3 kHz. Chaque sous-bande est capable de transporter de 4 à 15 bits en parallèle. En choisissant 8 bits par intervalle d'horloge, avec quatre mille intervalles de temps par seconde, le modem ADSL permet de transporter :

$4\,000 \times 8 \text{ bits} = 32 \text{ Kbit/s}$  par sous-bande

Comme il y a 20 sous-bandes, on arrive au total de  $32 \times 20 = 640 \text{ Kbit/s}$ .

La partie montante de la communication est découpée en 256 tranches de 4,3 kHz. Toujours pour un transport de 8 bits par intervalle de temps, on arrive au débit de :

$$4\,000 \times 8 \text{ bits} \times 256 = 8,2 \text{ Mbit/s}$$

Il est possible d'améliorer le débit en augmentant le nombre de bits par intervalle de temps et, surtout, la bande passante. Les modems ADSL2+ permettent ainsi de monter jusqu'à 28 Mbit/s en augmentant fortement la partie du spectre utilisée sur la voie descendante.

Des versions simplifiées de modems ADSL sont parfois mises en œuvre dans certains pays, telles que l'ADSL Lite, ou G-Lite, et l'U-ADSL (Universal ADSL). L'objectif de cette simplification est d'offrir un accès à Internet à très bas prix. Les capacités de transmission sont respectivement de 1,5 Mbit/s et 512 Kbit/s. Des cartes ADSL Lite sont commercialisées pour les PC.

Les modems G-Lite ressemblent aux modems ADSL, mais ils sont capables de s'adapter aux possibilités de la ligne. Le modem G-Lite ne se place pas à côté de la communication téléphonique, comme dans l'ADSL, mais prend toute la capacité de la ligne. Le modem s'interrompt si une communication téléphonique doit passer par la ligne. Les modems G-Lite s'adaptent bien aux accès haut débit, en particulier pour l'ATM. Dans ce cas, le protocole PPP peut être utilisé. Il a été standardisé dans cette configuration par l'ADSL Forum et par l'ANSI. Nous revenons sur les protocoles utilisés par les modems ultérieurement dans ce chapitre.

L'ADSL Forum a défini l'interface à respecter. Cette dernière suit l'architecture ATM, déployée par les opérateurs et les équipementiers du secteur des télécommunications vers le début des années 1990. À cette époque, l'ATM représentait une potentialité forte pour l'unification des réseaux des années 2000.

Les octets provenant des différentes sous-bandes sont encapsulés dans des trames ATM. Les trames ATM sont elles-mêmes encapsulées dans une trame de niveau physique, ou supertrame, qui correspond à la vitesse de l'accès ADSL. Par exemple, pour une connexion d'une capacité utile de 1,5 Mbit/s, les trames ATM sont transmises dans une supertrame de 68 cellules ATM, plus une cellule de synchronisation. Chaque supertrame demande un temps de 17 ms pour être émise, ce qui correspond à un peu moins de 250  $\mu\text{s}$  par trame. La vitesse de transmission utile pour le client atteint dans ce cas 1,5 Mbit/s, une fois enlevées les synchronisations et bits de redondance ou de correction d'erreur.

La trame ATM est aujourd'hui remplacée par la trame Ethernet. Cette solution s'explique aisément pour réaliser une continuité Ethernet entre la connexion de l'utilisateur et l'utilisation de solution Gigabit Ethernet entre le DSLAM et le réseau de l'opérateur. Cette solution est introduite au chapitre 13, dévolu à Ethernet.

### Le modem VDSL

Le déploiement de la fibre optique demande beaucoup de temps, car il faut poser les câbles et l'augmentation des accès optiques n'est que très lente. Le VDSL (Very high bit rate DSL) est une solution concurrente qui a l'avantage d'utiliser un câblage déjà en place. Deux générations se sont succédé : le VDSL et le VDSL2.

Les modems VDSL permettent d'atteindre des débits beaucoup plus élevés que les modems ADSL, mais sur quelques dizaines de mètres seulement. Leur capacité est de plusieurs dizaines de mégabits par seconde. Les modems VDSL peuvent se mettre à la sortie d'un PON (Passive Optical Network) pour prolonger leur liaison vers l'utilisateur.

Dans le VDSL de base, selon les propositions de l'ANSI, les débits en asymétrique devraient atteindre 6,4 Mbit/s dans le sens montant et 52 Mbit/s dans le sens descendant sur une distance de 300 m. Pour une distance de 1 000 m, il est possible d'obtenir la moitié des débits précédents. La bande de fréquences située entre 300 et 700 kHz est dévolue à la bande montante. La partie du spectre située entre 700 kHz et 30 MHz sert à la bande descendante. La partie basse du spectre est réservée à la parole téléphonique.

Comme dans le cas de l'ADSL, un filtre permet de séparer la partie téléphonique, qui va vers un répartiteur téléphonique, et la partie données, qui va vers l'équivalent d'un DSLAM, lequel peut utiliser la fibre optique du PON pour atteindre le local technique de l'opérateur.

Le VDSL2 utilise une bande passante encore plus large, de 0,14 MHz à 2,2 MHz pour la bande descendante et 2,2 MHz et 12 MHz pour la bande montante. Les débits peuvent atteindre 100 Mbit/s sur 3 600 mètres avec l'excellente qualité des paires téléphoniques torsadées. Pour une paire simple de 6/10, on peut obtenir les 100 Mbit/s en descente, mais sur une distance de seulement 500 mètres. Le standard ITU G.993.2 décrit ce protocole. La première version date de 2005, mais elle a été améliorée régulièrement jusqu'en 2011. Le déploiement en France démarre en 2014.

### Les DSLAM (DSL Access Module)

Les DSLAM forment l'autre extrémité de la liaison, chez l'opérateur. Ce sont des équipements dont le rôle est de récupérer les données émises par l'utilisateur depuis son équipement terminal au travers de son modem ADSL. Ces équipements intègrent des modems situés à la frontière de la boucle locale et du réseau de l'opérateur.

La figure 9.9 illustre le positionnement d'un DSLAM.

Les lignes des abonnés à l'opérateur local arrivent sur un répartiteur, qui permet de connecter l'utilisateur au commutateur téléphonique et au DSLAM s'il a un abonnement DSL. Le DSLAM est lui-même connecté à un concentrateur, que nous présentons un peu plus loin du point de vue protocolaire. Ce cas de figure est celui de l'opérateur historique.

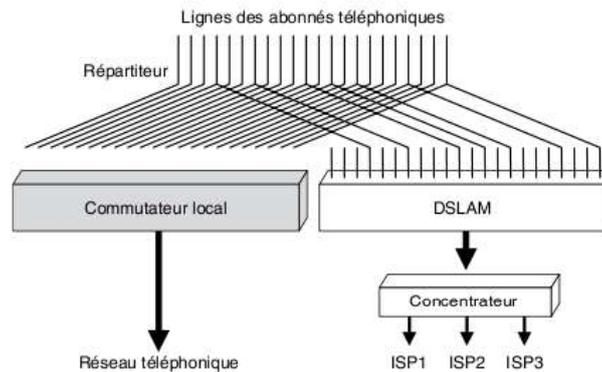


Figure 9.9

Positionnement d'un DSLAM

Le dégroupage désigne l'arrivée d'opérateurs alternatifs pour offrir des services téléphoniques, de données à haut débit et même de vidéo, comme la télévision.

Parmi les diverses possibilités de réalisation pratique du dégroupage, la pose de câbles a été envisagée pour réaliser une boucle locale différente de celle de l'opérateur historique, lequel en possédait, jusqu'à la fin des années 1990, le contrôle total. En raison du prix très élevé de la pose d'un réseau d'accès et de l'aberration que représenterait l'arrivée de plusieurs boucles locales jusque chez l'utilisateur, une par opérateur, d'autres solutions ont été adoptées. Certains opérateurs ont choisi de se positionner au niveau du répartiteur. À partir de ce répartiteur, ils ont installé leurs propres connexions et leur propre DSLAM.

L'inconvénient de cette solution provient de la situation géographique du DSLAM de l'opérateur alternatif, qui doit se trouver dans une salle connexe de celle de l'opérateur historique. De plus, l'opérateur alternatif doit tirer une liaison vers son propre réseau, sans connaître avec précision le nombre d'utilisateurs qui le choisiront.

Une autre possibilité consiste à se positionner derrière le DSLAM, en ayant son propre concentrateur ou bien, comme sur la figure, en se connectant à la sortie du concentrateur. L'opérateur qui prend en charge la connexion entre le modem de l'utilisateur et la sortie du concentrateur s'appelle le fournisseur d'accès, ou NAP (Network Access Provider).

Une dernière solution consiste à utiliser le réseau de France Télécom pour atteindre un PoP (Point of Presence) de l'opérateur alternatif. Nous examinons cette solution à la section suivante.

Jusqu'en 2004, les utilisateurs étaient obligés d'avoir un abonnement à France Télécom pour transmettre sur la boucle locale entre l'équipement terminal et le DSLAM. Désormais, la dérégulation est totale, et la facture de la communication sur la boucle locale est gérée par l'opérateur alternatif, qui doit cependant louer la ligne de la boucle locale à France Télécom.

## Les protocoles de l'ADSL

L'utilisateur générant des paquets IP, il faut pouvoir transporter ces paquets IP vers le modem ADSL. Pour cela, on utilise soit une trame Ethernet, soit une trame PPP, soit une trame USB (Universal Serial Bus), soit une superposition de ces trames, comme une trame PPP encapsulée dans une trame Ethernet ou une trame PPP encapsulée dans une trame USB.

Prenons l'exemple de paquets IP encapsulés dans une trame Ethernet. Cette trame est envoyée soit sur un réseau Ethernet reliant le PC du client au modem, soit dans une trame PPP sur une interface de type USB. Dans le modem ADSL, il faut décapsuler la trame pour récupérer le paquet IP puis l'encapsuler de nouveau. L'encapsulation se fait en général dans une trame PPP pour permettre d'utiliser des protocoles associés à PPP, comme les protocoles d'authentification PAP et CHAP. Cependant, pour transporter la trame PPP sur une distance assez longue à haute vitesse, on l'encapsule soit dans une trame ATM, soit dans une trame Ethernet. Cela correspond aux protocoles PPPoE (Point-to-Point Protocol over Ethernet) et PPPoA (Point-to-Point Protocol over ATM). Dans le cas de l'encapsulation dans ATM, la trame PPP est fragmentée en morceaux de 48 octets par le biais d'une couche AAL-5 (ATM Adaptation Layer de type 5).

Une fois la trame ATM arrivée dans le DSLAM, plusieurs cas de figure peuvent se présenter suivant l'architecture du réseau du FAI auquel le client est connecté. Une première solution consiste à décapsuler les cellules ATM et à récupérer le paquet IP qui est transmis vers le concentrateur dans une trame Ethernet. Le concentrateur l'envoie vers le FAI également dans une trame Ethernet.

Une deuxième solution consiste à laisser les trames sous forme ATM. C'est le cas lorsque l'opérateur de la boucle locale et le FAI utilisent la même technologie. Dans ce cas, la cellule ATM est directement envoyée vers le concentrateur, qui joue le rôle de commutateur ATM. Celui-ci envoie les trames ATM par des circuits virtuels vers des BAS (Broadband Access Server), qui sont les équipements intermédiaires permettant d'accéder aux réseaux des FAI alternatifs.

La solution aujourd'hui utilisée provient de PPPoE, qui remplace la trame ATM par une trame Ethernet et qui évite les fragmentations-réassemblages. Les topologies de ces réseaux sont illustrées à la figure 9.10.

## Le Multi-Play

Les modems ADSL ont été développés au départ pour réaliser un transport de données à haut débit de plusieurs mégabits par seconde. Ils se sont améliorés en introduisant de la téléphonie puis de la télévision.

Le principe de fonctionnement du Triple-Play est illustré à la figure 9.11.

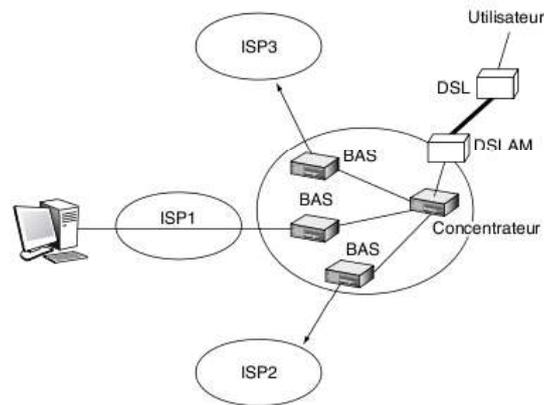


Figure 9.10

Équipements de concentration entre l'utilisateur et le serveur

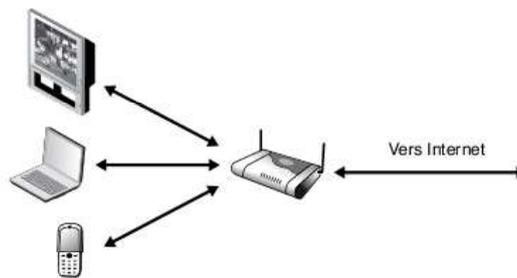


Figure 9.11

Le Triple-Play

Dans cette génération, chaque média passe par une prise différente permettant de récupérer facilement les flots de chacun des médias et de leur affecter des priorités associées : la parole téléphonique a une priorité supérieure à la télévision, qui a une priorité plus grande que les paquets de données.

Les flots peuvent être de nature différente. Par exemple, le téléphone peut encore être analogique ainsi que la télévision. Les codeurs-décodeurs se trouvant dans le modem ADSL, le boîtier de connexion prend le nom de Home Gateway ou encore InternetBox, car il intègre en plus du modem xDSL de nombreux codeurs-décodeurs et la paquetsation

des flots téléphoniques et de télévision. Cette solution correspond aux Home Gateways développées à partir de 2004 (LiveBox, FreeBox, etc.).

Les Home Gateways commencent à posséder des filtres applicatifs permettant de reconnaître directement le type de flot traversant le boîtier et de lui affecter la priorité correspondante. Cette solution permet de ne plus avoir à différencier les flots au niveau du terminal par leur port d'accès. La deuxième génération de Home Gateways n'aura plus qu'une seule prise d'accès de type Ethernet, comme illustrée à la figure 9.12.

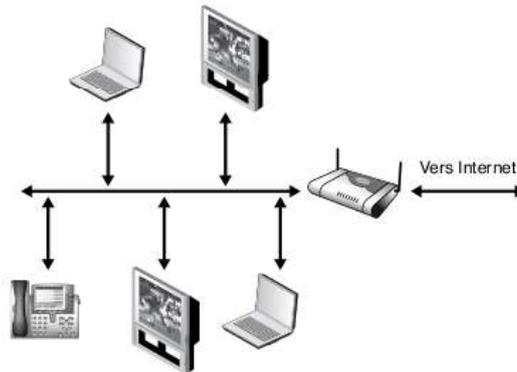
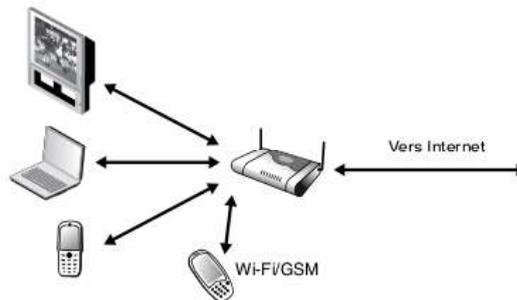


Figure 9.12

*Le Triple-Play de seconde génération*

Le Quadruple-Play est apparu en 2006 pour ajouter la mobilité aux accès à la Home Gateway. Dans cette solution, le portable mobile se raccorde au réseau sans fil inclus dans le boîtier : Wi-Fi en général mais également Bluetooth. Le téléphone peut-être uniquement Wi-Fi ou Bluetooth mais peut également être bi-mode pour permettre de passer au GSM en cas de coupure de la communication Wi-Fi ou Bluetooth. Cette solution s'apparente à la téléphonie sur IP puisque les octets de téléphonie sont encapsulés dans un paquet IP dans le terminal et que le paquet IP est lui-même encapsulé dans la trame associée à la technologie du réseau sans fil pour traverser l'interface radio.

Une extension particulièrement intéressante concerne la possibilité de se connecter sur une Home Gateway d'un autre utilisateur et de pouvoir téléphoner au coût de l'abonnement du FAI. Cette solution demande à ce que l'opérateur permette l'accès aux multiples Home Gateway à partir de connexions externes. Pour cela, une authentification est nécessaire, qui peut être réalisée par une carte SIM (Subscriber Identity Module). Le Quadruple-Play est illustré à la figure 9.13.

**Figure 9.13**

*Le Quadruple-Play*

Cette solution n'est pas forcément simple à gérer. En effet, la vitesse de la connexion dépend en grande partie de l'éloignement de l'utilisateur. Suivant les opérateurs, différentes solutions ont été développées pour contrer ce problème : limiter fortement le nombre de connexions, interdire les connexions quand l'utilisateur se sert de sa Home Gateway, limiter le débit accessible depuis l'extérieur, etc.

Le Penta-Play est une extension de la téléphonie mobile en y ajoutant la télévision. Le flot de paquets IP provenant du client transporte les images et le son du canal de télévision. L'inconvénient majeur de cette solution est le besoin d'une capacité plus importante de transmission.

### La boucle locale électrique

Le courant fort représente un remarquable réseau d'accès, aussi étendu et aussi dense que le réseau d'accès des opérateurs télécoms, sinon plus. Sur ces câbles métalliques, il est tentant de vouloir faire passer simultanément du courant électrique et du courant faible. Cependant, la perturbation est très importante, et les débits atteints sur des distances de quelques kilomètres sont faibles.

Les techniques de passage de données informatiques sur des courants électriques portent le nom de CPL (courant porteur en ligne), en anglais PLC (Power Line Communication). On utilise l'infrastructure basse tension sur 50 ou 60 Hz depuis le transformateur basse tension ou simplement à l'intérieur de la maison. Comme pour les réseaux des câblo-opérateurs, la communication se fait à partir d'une tête de réseau (le transformateur basse tension) vers les utilisateurs, c'est-à-dire par une communication multipoint allant d'un point vers plusieurs points. Dans le sens descendant, il n'y a pas de problème particulier puisqu'il y a diffusion et que le destinataire se reconnaît. En revanche, de l'utilisateur vers le réseau, une méthode d'accès au support physique est nécessaire.



Les résultats des tests qui ont été effectués dans de nombreux pays sont très divergents, ce qui semble indiquer la sensibilité du système et l'importance de la mise en place des dérivations. Bien évidemment, la longueur du tronçon électrique à emprunter est déterminante. Comme dans les techniques ADSL, il ne faut pas que l'accès à l'équivalent du DSLAM soit éloigné de plus de quelques kilomètres. Cette technique peut être appelée PDSL (Power Data Subscriber Line).

Le standard correspondant porte le nom de G3-PLC. Son étude a démarré en 2011 sous l'égide d'un groupement d'industriels mené par ERDF. Cette solution utilise l'OFDM à 400 MHz de bande passante et une couche MAC de type IEEE 802.15.4, c'est-à-dire ZigBee que nous étudions au chapitre 21. C'est un réseau orienté vers IPv6 avec un objectif important : créer la Smart Grid. La Smart Grid est la grille réalisée avec les compteurs électriques intelligents des utilisateurs. Ceux-ci ont la possibilité de gérer la consommation électrique de leur domicile et d'envoyer des informations de contrôle vers le Cloud. Ces émissions vers le Cloud devraient passer par l'intermédiaire du standard G3-PLC. Un autre produit en gestation pour la Smart Grid est proposé par le standard IEEE 802.11ah, c'est-à-dire un réseau Wi-Fi longue portée mais bas débit qui est décrit plus en détail au chapitre 22.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté les différentes technologies d'accès terrestre. Dans les différentes options, le câble téléphonique est le plus utilisé en France. Cela s'explique par le fort développement de ce média dans les années 1960 et 1970. Cependant, le câble téléphonique est généralement de faible qualité, et la distance y est un critère important de détermination du débit. Une nouvelle boucle locale est en cours de réalisation avec la fibre optique et le VDSL2 pour passer aux très hauts débits.

La boucle locale hertzienne est beaucoup plus jeune mais déjà très compétitive par rapport à la boucle locale terrestre. Deux grandes solutions se développent en parallèle : les réseaux qui acceptent les mobiles, c'est-à-dire qui sont capables de réaliser des changements intercellulaires, et les réseaux sans fil qui offrent de plus hauts débits, mais sans mobilité. Nous examinons ces solutions au chapitre suivant.



## Les réseaux d'accès hertziens

---

Les réseaux hertziens apportent une grande flexibilité de par leur interface, qui permet à un utilisateur de changer de place tout en restant connecté. Les communications entre équipements terminaux peuvent s'effectuer directement ou par le biais de stations de base, appelées encore points d'accès, ou AP (Access Point). Les communications des points d'accès vers le réseau sont effectuées soit par voie hertzienne (relais hertzien ou onde millimétrique), soit par câble (xDSL ou fibre optique). Ce réseau intermédiaire entre l'accès proprement dit et le réseau cœur de l'opérateur s'appelle le réseau backhaul. Un cas particulier mais qui se développe provient des réseaux mesh et ad-hoc, que nous détaillons plus spécifiquement au chapitre 23. Ces réseaux permettent de passer de point d'accès en point d'accès jusqu'à un accès terrestre ou hertzien vers le réseau cœur.

Les réseaux hertziens se décomposent en deux grandes catégories : les réseaux dits sans fil et les réseaux de mobiles. À la différence des réseaux sans fil, les réseaux de mobiles permettent de passer d'une cellule à une autre sans couper la communication. On peut également regrouper les réseaux de mobiles dans la catégorie sans fil puisqu'ils n'utilisent pas de connexions filaires.

Ces deux catégories de réseaux sont fondamentalement différentes : les réseaux de mobiles sont complexes et permettent le passage intercellulaire, ou handover ou encore handoff. Les réseaux sans fil sont beaucoup plus simples, mais l'utilisateur doit rester dans sa cellule, bien que des handovers soient aujourd'hui possibles avec une faible vitesse de déplacement.

Plusieurs gammes de produits sont actuellement commercialisées dans les deux catégories. Dans le cadre des réseaux sans fil, le groupe de travail qui se charge de cette normalisation provient essentiellement de l'IEEE. Les réseaux de mobiles sont normalisés par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project). On y trouve quatre générations : 1G, 2G, 3G et 4G et bientôt une nouvelle catégorie apparaîtra formellement : la 5G. La 1G a disparu dans la plupart des pays, la 2G correspond au GSM, la 3G à l'UMTS et la 4G au LTE-Advanced ou LTE-A.

## Les normes des réseaux sans fil

Les principales normes de réseaux sans fil illustrées à la figure 10.1 sont les suivantes :

- IEEE 802.15, pour les petits réseaux personnels d'une dizaine de mètres de portée ;
- IEEE 802.11, ou Wi-Fi, pour les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network) ;
- IEEE 802.16, pour les réseaux WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) atteignant plus de dix kilomètres de portée ;
- IEEE 802.22, pour les WRAN (Wireless Regional Area Network).

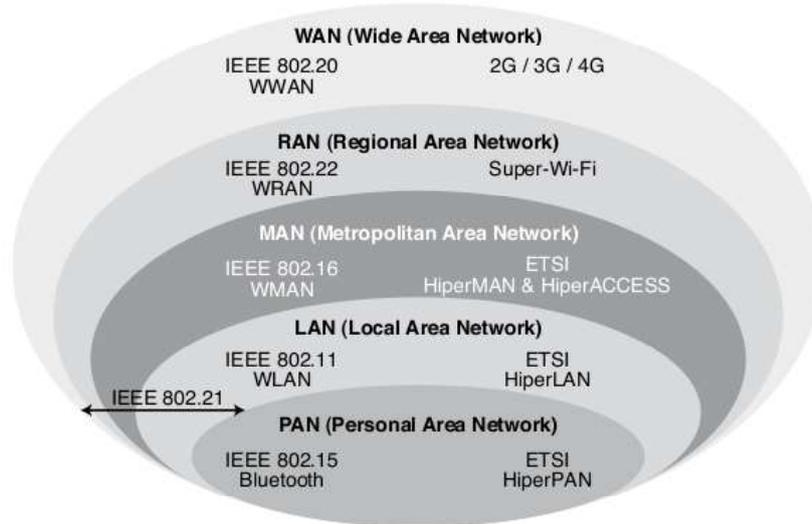


Figure 10.1

Classement des réseaux sans fil suivant leur étendue

Dans le groupe IEEE 802.15, trois principaux sous-groupes normalisent des gammes de produits en parallèle :

- IEEE 802.15.1, le plus connu, qui a pris en charge la norme Bluetooth jusqu'en 2005.
- IEEE 802.15.3, qui a défini la norme UWB (Ultra-Wide Band).
- IEEE 802.15.4, qui s'occupe de la norme ZigBee.
- D'autres groupes de travail plus spécifiques sont détaillés au chapitre 21.

Du côté de la norme IEEE 802.11, ou Wi-Fi (Wireless-Fidelity), six propositions ont été avalisées, dont les débits vont de 11 Mbit/s (IEEE 802.11b) puis 54 Mbit/s (IEEE 802.11a et g) puis 600 Mbit/s en pointe (IEEE 802.11n), puis 1,2 Gbit/s (IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad), atteignant 6 Gbit/s sur de courtes distances. De nouveaux standards devraient également apparaître sous peu avec l'IEEE 802.11af, avec plus de 10 Gbit/s en débit crête, et IEEE 802.11ah, qui vise des distances beaucoup plus grandes avec des débits faibles. Les fréquences utilisées ainsi que les différents standards indiqués plus haut sont représentés à la figure 10.2.

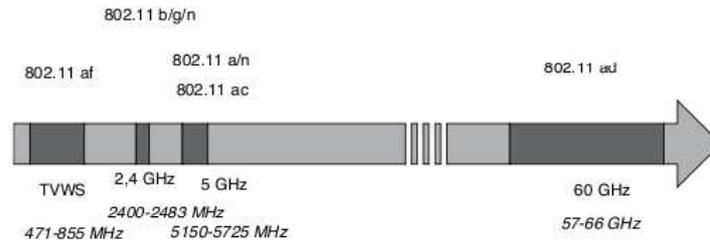


Figure 10.2

Standards et fréquences des réseaux Wi-Fi

Les réseaux hertziens IEEE 802.16 visent à remplacer les réseaux téléphoniques fixes utilisant des modems ADSL afin de donner à l'utilisateur final des débits du même ordre de grandeur, c'est-à-dire jusqu'à plusieurs mégabits par seconde. Ces réseaux forment ce que l'on appelle la boucle locale radio.

Plusieurs normes sont proposées suivant la fréquence utilisée. Un consortium s'est mis en place pour développer les applications de cette norme sous le nom de WiMAX Forum. Deux versions sont commercialisées, l'une fixe, dont l'objectif est clairement de remplacer l'ADSL dans les zones rurales, l'autre mobile, permettant d'avoir un modem ADSL dans sa poche et toujours connecté. Ces standards ont été peu utilisés et sont fortement concurrencés par les réseaux de mobiles du 3GPP qui les ont étouffés.

Les réseaux régionaux sont étudiés par l'IEEE 802.22. Le rayon de la cellule peut atteindre 50 km pour les gammes de fréquences en dessous de 1 GHz. La distance potentielle du terminal à l'antenne étant importante, le débit montant est assez limité. En revanche, sur la bande descendante, 4 Mbit/s sont disponibles. L'application de base est la télévision interactive ou les jeux vidéo interactifs.

## Typologie des réseaux hertziens

Cette section introduit les solutions issues de l'utilisation de fréquences hertziennes pour la desserte des entreprises et des utilisateurs résidentiels en lieu et place des câbles métalliques ou de la fibre optique enfouis dans le sous-sol. Les débits des réseaux hertziens peuvent se révéler très importants grâce à des techniques de codage de plus en plus sophistiquées, une méthode d'accès adaptée et une bonne réutilisation des ressources spectrales.

Nous commencerons par décrire la boucle locale hertzienne, puis examinerons les méthodes d'accès dans ces réseaux. Nous donnerons ensuite quelques exemples de réseaux d'accès radio. Enfin, nous présenterons les différentes générations de réseaux de mobiles.

La boucle locale satellite est une autre solution pour accéder au réseau terrestre d'un opérateur. Dans ce cas, le signal part de l'entreprise et, grâce à une antenne, accède au satellite, qui renvoie le signal vers le central d'accès d'un opérateur de télécommunications. Nous détaillerons également le fonctionnement de cette boucle locale.

### La boucle locale sans fil

La technologie hertzienne est facilement utilisable dans la boucle locale puisque les techniques sans fil permettent, au prix d'infrastructures terrestres minimales, de relier un opérateur à ses clients. La différence avec les réseaux de mobiles provient de l'immobilité du client : il s'agit dans ce cadre de relier un domicile ou une entreprise au réseau de l'opérateur. Il n'y a pas besoin de gérer la mobilité de l'utilisateur ce qui évidemment simplifie considérablement le système.

L'abréviation BLR (boucle locale radio) est la terminologie adoptée en France. Elle recouvre un certain nombre de techniques adaptées au cas français. Une autre façon de présenter cette solution est de parler de WDSL (Wireless Data Subscriber Line). Nous essaierons dans la suite de ce chapitre de nous positionner de façon plus générale en incluant les technologies et les fréquences utilisées à l'étranger.

La boucle locale radio est une technologie sans fil bidirectionnelle, dans laquelle l'équipement terminal ne peut être mobile — du moins pour le moment — au sens d'un réseau de mobiles. L'antenne de réception doit être grande et fixe.

Une boucle locale radio est illustrée à la figure 10.3. Elle est formée d'un ensemble de cellules (en grisé sur la figure). Chaque cellule est raccordée à une station de base, qui dessert les utilisateurs abonnés. La station de base est constituée d'une ou plusieurs antennes reliées aux utilisateurs directement par un faisceau hertzien. Les stations de base sont interconnectées par un réseau terrestre. L'accès à ce réseau terrestre s'effectue par le biais d'un commutateur.

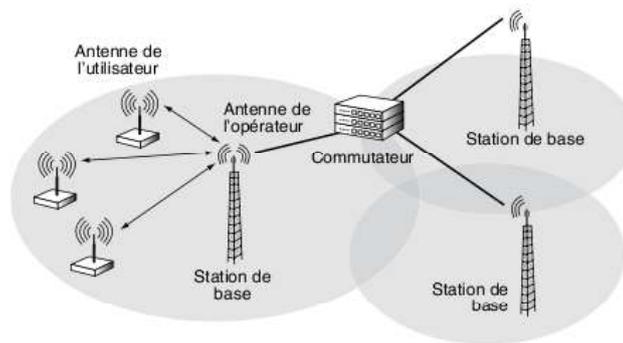


Figure 10.3

*Boucle locale radio*

L'avantage de cette solution de réseau d'accès réside dans la simplicité de sa mise en place. Il suffit de relier l'antenne de l'utilisateur à l'antenne de la station de base, évitant de la sorte tous les travaux de génie civil que demande la pose de câbles. Cependant, il ne faut pas négliger la mise en place de l'infrastructure à l'intérieur du ou des bâtiments de l'utilisateur pour connecter toutes les machines à l'antenne, laquelle doit être généralement en vue directe de l'antenne de l'opérateur.

Dans la suite, nous appelons WLL (Wireless Local Loop) toutes les boucles locales sans fil, incluant à la fois les technologies adoptées en France sous le nom de BLR et celles utilisées hors de France.

### Les systèmes WLL

Les systèmes WLL proviennent de différentes technologies hertziennes qui ont pour but de transférer des données à la plus haute vitesse possible. Ils doivent être compétitifs par rapport à leur homologue fixe et, de ce fait, posséder les propriétés suivantes :

- Modems à faible coût, à peine plus élevé que les modems ADSL ou câble.
- Bande passante importante, pour que, en période de forte occupation, chaque utilisateur puisse continuer à travailler de façon satisfaisante.
- Techniques de transmission des données évoluées, afin d'offrir des débits acceptables pour chaque utilisateur, même en période de pointe.
- Grande flexibilité, permettant de prendre en charge les différents types de trafic, allant de la parole téléphonique aux transports de données à très haute vitesse.
- Architecture modulaire, pour permettre les mises à niveau en cas d'améliorations techniques des interfaces air.

Les systèmes WLL disponibles sur le marché sont de plus en plus nombreux. Nous allons en décrire trois exemples :

- Les technologies IEEE 802.11 directives, dites encore Wi-Fi directif.
- IEEE 802.16, ou WiMAX, une norme stabilisée en décembre 2004 et qui s'est fortement répandue depuis. Une version spécifique, le WiBro a été développée en Corée.
- IEEE 802.22, qui préfigure les connexions sur de plus longues portées afin de diminuer les coûts de déploiement.

### L'allocation de ressources

Dans un système de transmission, chaque communication consomme une ressource physique dont le volume dépend de la quantité d'information à envoyer. Sur l'interface radio, la ressource est le canal physique. Le système commence par définir ce canal, puis il planifie la distribution du canal entre les différents utilisateurs à l'aide de mécanismes d'allocations de ressources. L'ensemble des ressources disponibles forme la *bande passante*. Cette bande est divisée en plusieurs ensembles de canaux radio non interférents. Ces canaux peuvent être utilisés simultanément, à condition qu'ils garantissent une qualité acceptable. Le multiplexage de plusieurs communications sur une même bande passante se fait à l'aide des techniques FDMA, TDMA, CDMA, SDMA, et enfin OFDMA, qui est la plus utilisée aujourd'hui.

La principale caractéristique de l'interface radio est l'affaiblissement de la puissance en fonction de la distance qui sépare l'utilisateur mobile de sa station de base.

#### L'atténuation ou l'affaiblissement

La puissance reçue ( $C$ ) est directement liée à la puissance émise ( $P_e$ ). Elle est calculée par la formule  $C = P_e d^{-\alpha}$ ,  $d$  étant le paramètre de l'environnement de propagation, qui peut être urbain ou rural ; le  $\alpha$  caractérise cet environnement, lequel peut varier de 2 à 4.

La puissance d'émission de chaque canal doit être optimisée. Cela permet d'assurer une bonne qualité de service de la communication sur le lien radio. L'allocation de ressources, qui consiste en la réutilisation d'un canal, doit respecter un certain rapport signal sur interférence, ou  $C/I$  (Carrier to Interference Ratio), qui est un paramètre d'optimisation du réseau. La variable  $C$  correspond à la puissance du signal reçu, et la variable  $I$  à la somme de tous les signaux des utilisateurs naviguant sur le même canal.

#### Les schémas d'allocation de ressources

En résumé, l'allocation d'un canal est le produit de l'interaction entre plusieurs paramètres, tels que l'interférence, la distance de réutilisation, etc., que des schémas d'allocation de ressources permettent de contrôler à travers le réseau.

Il existe trois grandes familles de schémas d'allocation de ressources :

- **FCA (Fixed Channel Assignment)**. La plupart des systèmes existants fonctionnent avec une assignation fixe. Ce schéma a l'avantage de la simplicité et de la rapidité.

Il s'agit d'une attribution fixe de ressources à toutes les stations. Cette attribution dépend du dimensionnement du réseau et des prévisions de trafic. Ce schéma trouve ses limites dans le fait qu'il ne permet pas de gérer les variations brutales et instantanées du trafic, telles que les embouteillages et les grandes manifestations, ce qui rend l'utilisation de la bande passante peu efficace. Cette situation peut se traduire par un manque de ressources pour certaines stations et une sous-utilisation pour d'autres.

- **DCA (Dynamic Channel Assignment).** Dans le DCA, toutes les ressources sont concentrées dans un groupe commun, ou *common pool*, tandis qu'un système central ou distribué tente d'allouer les canaux à la demande des utilisateurs. Ce procédé, qui respecte le taux d'interférences *C/I* sur le canal, peut accroître de façon considérable la capacité du système, en particulier dans le cas d'une distribution du trafic non uniforme dans le temps. La mise en place de ce schéma requiert en contrepartie une importante charge de signalisation et une forte puissance de calcul pour trouver rapidement une solution d'allocation optimale.
- **HCA (Hybrid Channel Assignment).** Dans ce schéma, qui mélange les deux précédents, une partie des ressources est allouée directement aux stations, le reste étant rassemblé dans un groupe commun, auquel toutes les stations peuvent accéder lorsque leur ensemble fixe est complètement alloué.

#### Les techniques d'accès FCA

Dans les réseaux radio qui partagent le canal radio entre plusieurs utilisateurs, il faut une technique d'accès qui permette à l'utilisateur d'émettre ses paquets. Par exemple, le satellite pouvant être vu comme un miroir qui reflète les signaux reçus, si plusieurs paquets lui arrivent simultanément, leurs signaux se superposent. Pour éviter ces collisions, différentes techniques d'accès ont été proposées, des plus simples aux plus complexes. Comme les stations sont indépendantes les unes des autres et que le temps aller-retour permettant à une station de correspondre avec une autre peut devenir important, il faut pouvoir, dans certains cas, allouer le canal d'une façon anticipée.

Des méthodes de réservation fixe, ou FAMA (Fixed-Assignment Multiple Access), allouent la ressource canal à une station déterminée à un instant donné ou sur un code déterminé à l'avance ou encore sur un espace dédié. Les quatre principales d'entre elles sont les suivantes :

- FDMA (Frequency Division Multiple Access), qui divise la ressource canal en plusieurs bandes de fréquences pouvant être de largeur variable. Les fréquences sont attribuées aux différentes stations selon leur besoin.
- TDMA (Time Division Multiple Access), qui consiste à découper le temps en tranches et à allouer les tranches aux stations. Soit les tranches sont de taille différente, et les stations terrestres se voient affecter une tranche correspondant à leur débit, soit les tranches sont d'une longueur fixe assez petite, correspondant à un débit de base, les stations qui souhaitent un débit plus important possédant plusieurs tranches de temps.
- CDMA (Code Division Multiple Access), qui consiste à allouer aux différentes stations la bande passante globale mais avec un code tel que tous les signaux sont émis en

même temps, le récepteur étant capable de déterminer les signaux à capter en fonction du code et de la puissance associée.

- SDMA (Space Division Multiple Access), qui consiste à diviser l'espace en plusieurs secteurs, de sorte qu'une antenne directive n'émette que sur un espace réduit au lieu de diffuser ses signaux dans toutes les directions. Cette solution permet de beaucoup mieux utiliser l'espace hertzien et donne une forte réutilisation des fréquences. De plus, le signal étant directif, la portée peut-être beaucoup plus grande.
- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), qui est aujourd'hui la technique la plus utilisée dans les réseaux modernes. Elle utilise l'allocation FDMA, mais au lieu d'être obligé de séparer les canaux des différentes fréquences, on utilise des fréquences orthogonales : lorsque la puissance est maximale sur une fréquence, elle est nulle sur les fréquences connexes.

#### FDMA, TDMA, CDMA, SDMA et OFDMA

##### Le FDMA

Utilisé en premier, le FDMA tend à disparaître dans les réseaux d'accès pour renaître sous une autre forme, avec l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) que nous détaillons plus loin.

Supposons un nombre  $n$  de stations terrestres. On découpe la bande de fréquences  $f_1$  en  $n$  sous-bandes, comme illustré à la figure 10.4, de façon à permettre à chaque station d'émettre indépendamment des autres liaisons.

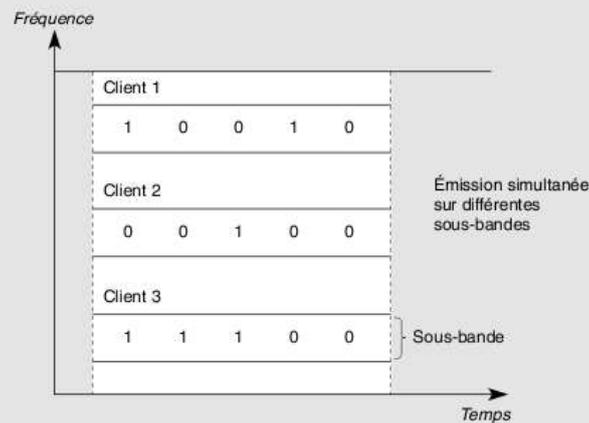


Figure 10.4

Le FDMA

Chaque station comporte de ce fait un modulateur, un émetteur,  $n$  récepteurs et  $n$  démodulateurs. Lorsque la solution est utilisée pour une connexion par satellite, le satellite doit amplifier simultanément les  $n$  porteuses. Il se crée donc nécessairement des brouillages, qui croissent rapidement en fonction de la puissance, avec pour conséquence que plus de la moitié de la capacité de transmission peut être perdue.

Pour éviter les collisions, on répartit le canal équitablement entre les divers utilisateurs. Les limites de cette technique sont évidentes : si une ou plusieurs liaisons sont inutilisées, il y a perte sèche des bandes correspondantes. Si l'on veut rendre cette politique dynamique en répartissant la fréquence  $f_1$  entre les utilisateurs actifs ou si l'on veut introduire une nouvelle station dans le réseau, il faut imposer une nouvelle répartition des fréquences, ce qui pose de nombreux problèmes et ne peut se faire que sur des tranches de temps assez longues.

#### Le TDMA

Avec le TDMA, on découpe le temps en tranches, que l'on affecte successivement aux différentes stations d'émission, comme illustré à la figure 10.5.

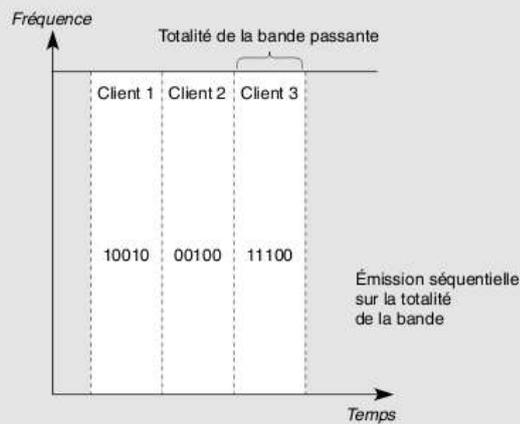


Figure 10.5

Le TDMA

Toutes les stations émettent avec la même fréquence sur l'ensemble de la bande passante, mais successivement. À l'opposé du fonctionnement en FDMA, chaque station possède un seul récepteur démodulateur. Chaque tranche de temps est composée d'un en-tête, ou préambule, qui a plusieurs fonctions : les premiers éléments binaires permettent d'acquiescer les circuits de recouvrement de porteuse et de rythme du démodulateur. L'en-tête transmet également les informations nécessaires à l'identification de la station émettrice. Il est nécessaire de synchroniser l'émission en début de tranche de façon qu'il n'y ait pas de chevauchement possible. Il existe entre chaque tranche un intervalle réservé à cet effet.

Globalement, le rendement du TDMA est meilleur que celui du FDMA. De plus, il est facile de découper de nouvelles tranches de temps si des stations supplémentaires se connectent sur le canal. La tranche de temps, ou slot, a une durée variable, qui dépend de l'application sous-jacente. Par exemple, dans le cas du transport de la parole téléphonique numérisée sur un multiplex normalisé de 2 Mbit/s (correspondant à 30 voies téléphoniques), une tranche de temps est composée de 6 blocs de 125  $\mu$ s. Les signaux transmis pendant cette tranche forment une trame de 750  $\mu$ s précédée d'un préambule. Il est évident que l'augmentation de la durée des tranches de temps diminue la fraction du temps perdu en en-tête et augmente l'efficacité de la transmission et le taux d'utilisation réel du canal.

Comme nous venons de le voir, toute la difficulté du TDMA est de passer le relais aux émetteurs qui en ont réellement besoin, au bon moment et avec la tranche de temps la plus longue possible. Il convient dans ce cas de recourir à une politique d'allocation dynamique : les stations demandent, au fur et à mesure de leurs besoins, les tranches nécessaires pour écouler leur trafic. Ces demandes d'allocation ont toutefois l'inconvénient d'alourdir la gestion du système et d'augmenter sensiblement le temps de réponse, puisqu'il faut au minimum deux allers-retours pour obtenir de la station maître qui gère le système les tranches de temps correspondant à la demande.

#### Le CDMA

Avec le CDMA, que l'on trouve dans les réseaux de mobiles terrestres de troisième génération, la station terrestre émet sur l'ensemble de la bande passante mais avec un code qui détermine sa puissance en fonction de la fréquence. Cette solution permet au récepteur de décoder les signaux et de les récupérer. La difficulté de cette méthode réside dans une émission avec une puissance déterminée, de façon que la station terrestre de réception puisse démêler tous les signaux reçus simultanément. La figure 10.6 illustre ce processus.

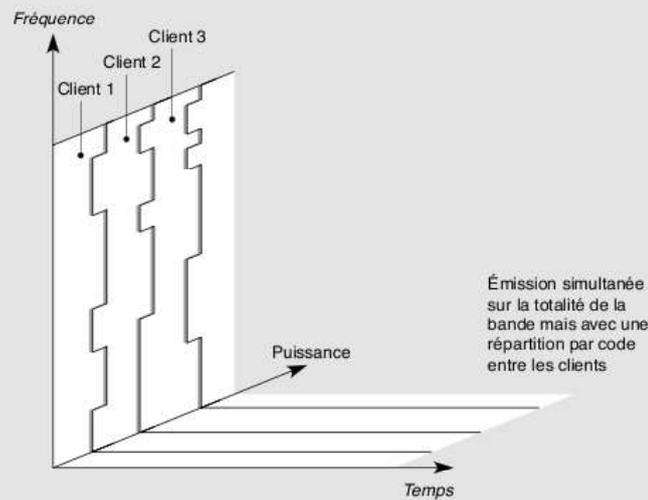


Figure 10.6

Le CDMA

### Le SDMA

Le SDMA est une technologie encore peu utilisée, qui demande une antenne intelligente capable de s'adapter pour émettre sur un secteur précis, avec une puissance déterminée. Si une station est située près de l'antenne de réception, il est en effet inutile d'émettre avec une forte puissance et dans toutes les directions à la fois. La méthode SDMA permet de limiter géographiquement la surface sur laquelle la fréquence est utilisée permettant ainsi une excellente réutilisation.

### L'OFDMA

L'OFDMA est une des techniques les plus utilisées aujourd'hui dans les réseaux modernes. Elle utilise la technique d'allocation FDMA, mais au lieu d'être obligé de séparer les canaux des différentes fréquences, on utilise des fréquences orthogonales : lorsque la puissance est maximale sur une fréquence, elle est nulle sur les fréquences connexes. Cette solution est illustrée à la figure 10.7.

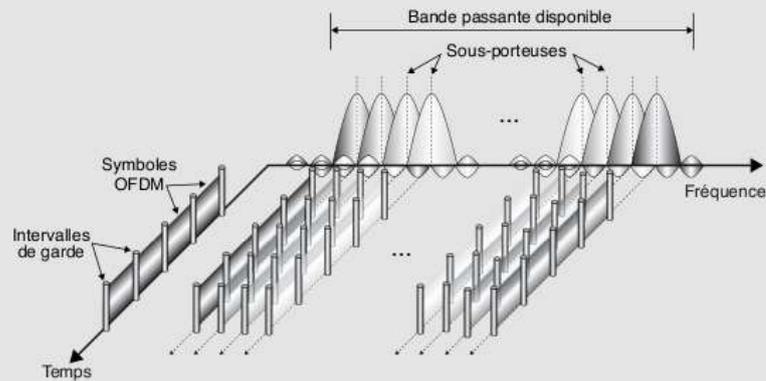
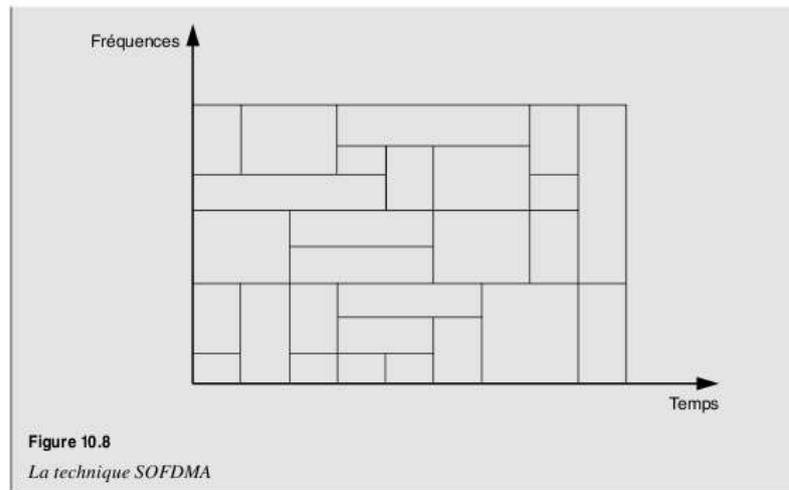


Figure 10.7

*Les fréquences de l'OFDMA*

Cette solution permet de transporter des éléments binaires différents sur chaque sous-bande, de telle sorte que plusieurs bits, voire octets, puissent être transmis simultanément.

Il est possible d'améliorer encore cette solution, en affectant les sous-bandes à des stations différentes. On parle alors de SOFDMA (Scalable OFDMA). Comme l'illustre la figure 10.8, il est ainsi possible de partager de façon beaucoup plus fine le canal radio et de donner à chaque station le débit exact dont elle a besoin.



#### Les méthodes dynamiques DCA

Les méthodes DCA (Dynamic Channel Assignment) ont pour objectif de mieux utiliser le canal, mais avec un effort de calcul beaucoup plus important.

Les politiques d'accès aux canaux doivent favoriser une utilisation maximale du canal, celui-ci étant la ressource fondamentale du système. Dans les réseaux locaux, le délai de propagation très court permet d'arrêter les transmissions après un temps négligeable. Dans le cas de satellites géostationnaires, les stations terrestres ne découvrent qu'il y a eu chevauchement des signaux que 0,27 s après leur émission — elles peuvent s'écouter grâce à la propriété de diffusion —, ce qui représente une perte importante sur un canal d'une capacité de plusieurs mégabits par seconde.

Les trois grandes catégories de techniques DCA sont les suivantes :

- méthodes d'accès aléatoires, ou RA (Random Access) ;
- méthodes de réservation par paquet, ou PR (Packet Reservation) ;
- méthodes de réservation dynamique, ou DAMA (Demand Assignment Multiple Access).

Les techniques d'accès aléatoires donnent aux utilisateurs la possibilité de transmettre leurs données dans un ordre sans corrélation. En revanche, ces techniques ne se prêtent à aucune qualité de service. Leur point fort réside dans une implémentation simple et un coût de mise en œuvre assez bas.

La méthode la plus connue est celle qui est utilisée dans le cadre des réseaux Ethernet terrestres avec le CSMA/CD. Cette solution est étudiée en détail au chapitre 13. Dans les réseaux radio, la solution de base ne peut plus être utilisée, car il est impossible d'émettre et d'écouter en même temps. De ce fait, la solution a été modifiée en utilisant du CSMA/CA, que nous étudions en détail au chapitre 22.

Les méthodes de réservation par paquet évitent les collisions par l'utilisation d'un schéma de réservation de niveau paquet. Comme les utilisateurs sont distribués dans l'espace, il doit exister un sous-canal de signalisation à même de mettre les utilisateurs en communication pour gérer la réservation. Ces solutions sont surtout utilisées dans les réseaux satellite, que nous abordons un peu plus loin dans ce chapitre.

Les méthodes dynamiques de réservation ont pour but d'optimiser l'utilisation du canal. Ces techniques essaient de multiplexer un maximum d'utilisateurs sur le même canal en demandant aux utilisateurs d'effectuer une réservation pour un temps relativement court. Une fois la réservation acceptée, l'utilisateur vide ses mémoires tampons jusqu'à la fin de la réservation puis relâche le canal.

## Exemples de réseaux d'accès hertziens

Cette section introduit trois techniques de réseaux radio sans fil qui peuvent être utilisées dans la boucle locale.

### IEEE 802.11

Le groupe de travail IEEE 802.11 a normalisé un ensemble de standards correspondant aux différents réseaux Wi-Fi que nous détaillons au chapitre 22. Nous nous intéressons ici uniquement à l'utilisation directionnelle d'un environnement Wi-Fi de façon à arroser une zone lointaine ou relier des stations situées à plusieurs kilomètres l'une de l'autre. Beaucoup de municipalités utilisent cette solution très peu onéreuse, dont le seul inconvénient est d'utiliser des fréquences partagées, puisque situées dans les bandes libres des 2,4 ou 5,15 GHz.

La réglementation française autorise une puissance d'émission maximale en intérieur de 100 mW dans la bande des 2,4 GHz et à l'extérieur de 100 mW également dans la bande 2,400-2,454 GHz et 10 mW dans la bande 2,454-2,483 5 GHz. La bande des 5 GHz n'est utilisable qu'en milieu intérieur et est formellement interdite à l'extérieur.

Le choix d'une antenne dépend de ce que l'on veut en faire. Pour le cas illustré à la figure 10.9, la puissance d'émission, ou PIRE (puissance isotrope rayonnée effective), équivaut à la somme des puissances de l'émetteur ( $P_e$ ), de l'amplificateur ( $P_{\text{ampli}}$ ) et du gain de l'antenne ( $G_{\text{antenne}}$ ) moins la perte sur la ligne, exprimée en dBm. Dans le cas où il n'y a pas d'amplificateur, le calcul se résume à la somme de la puissance de l'émetteur et du gain de l'antenne moins la perte sur la ligne due au câble reliant l'antenne à l'émetteur. Dans le cas général, on obtient :

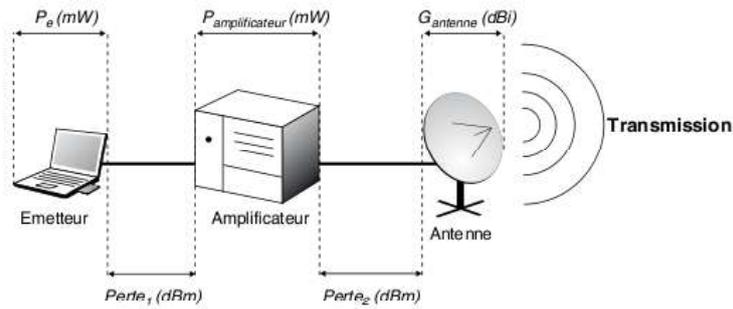


Figure 10.9

Calcul de la PIRE

Considérons une carte Wi-Fi 802.11 ayant une puissance d'émission de 30 mW. On voudrait se connecter par le biais d'un ordinateur portable à un point d'accès se trouvant à quelques kilomètres. La capacité de l'antenne interne de la carte n'autorisant une zone de couverture que de l'ordre d'une centaine de mètres, il est nécessaire de connecter une antenne à la carte. Prenons comme exemple une antenne de type parabole ayant un gain de 24 dBi reliée par un câble de 3 m dont la perte est de 2 dB/m. La perte totale est donc de 6 dB.

Pour trouver la PIRE, il faut que toutes les valeurs de la somme s'expriment en dBm. En appliquant la formule précédente, une puissance de 30 mW correspond à un gain de 14,77 dBm. La PIRE équivaut à  $14,77 + 24 - (3 \times 2)$ , soit 32,77 dBm. Cela correspond à 1 892 mW, soit près de 20 fois la puissance maximale autorisée. Le déploiement dans ces conditions est illégal.

On voit donc que plus l'antenne est directive, plus la puissance doit être faible. Il n'empêche qu'avec des antennes directives, il est possible de couvrir des zones assez grandes et de relier un terminal à une antenne avec des distances importantes. Cette solution est parfois utilisée par des opérateurs pour relier des points hauts à des débits de 11 ou 54 Mbit/s.

### IEEE 802.16

L'IEEE a mis en place le groupe de travail 802.16 pour proposer des standards de réseaux métropolitains dans la lignée des solutions développées pour les réseaux locaux et plus particulièrement de Wi-Fi.

Le groupe de travail 802.16 s'est d'abord préoccupé de la bande du spectre hertzien et a proposé l'utilisation de certaines bandes, comprises entre 2 et 11 GHz, dont les fréquences ne sont pas trop directives, et des plages situées entre 11 et 66 GHz, dont les fréquences sont hyperdirectives et demandent une visibilité directe des antennes.

Les standards IEEE 802.16 sont organisés en trois niveaux :

- **Le niveau physique.** Spécifie les fréquences, schémas de modulation, synchronisations, vitesses, techniques de découpage dans le temps (de type TDMA) et techniques de détection et de correction d'erreur, qui peuvent être choisies en option. La proposition de standard concerne la technique DAMA-TDMA (Demand Assignment Multiple Access-Time Division Multiple Access), qui correspond à une réservation dynamique de bande passante par l'intermédiaire de slots de temps. En d'autres termes, le temps est divisé en trames de longueur constante, elles-mêmes divisées en slots. Les slots sont alloués aux utilisateurs par des techniques de réservation. Dans le sens utilisateur vers réseau, l'allocation des slots est assez simple puisque la station de base sait ce qu'elle a à envoyer. Dans l'autre sens, le processus est plus complexe, puisque les stations sont indépendantes les unes des autres et que la communication entre les stations de base ne peut se faire qu'au travers de la station de base, *via* l'antenne de l'opérateur. Sur la voie allant de l'opérateur aux clients, deux modes sont proposés. Le mode A concerne les flux de type *stream*, c'est-à-dire les flux continus qui possèdent des points de synchronisation. Le mode B concerne les flots fondés sur les applications classiques du monde IP.
- **Le niveau MAC.** Situé au-dessus du niveau physique, il gère l'allocation des slots et utilise la méthode DAMA-TDMA.
- **L'interface de communication avec les applications.** Le niveau recherché est de type IP, mais la trame ATM peut aussi être émise sur la voie hertzienne directement dans les slots choisis par le niveau MAC. IP devenant de plus en plus le standard de référence, cette couche se concentre sur la gestion du niveau IP et l'encapsulation des paquets IP dans une trame adaptée à la tranche de temps. Au récepteur, les fragments sont réassemblés pour redonner le paquet IP.

Les trois standards 802.16 les plus importants sont les suivants :

- **IEEE 802.16 2004.** Révise et corrige quelques erreurs détectées dans les standards 802.16 et 802.16a et apporte des améliorations. C'est le standard que suivent les produits WiMAX fixe.
- **IEEE 802.16e.** Le standard est sorti en décembre 2005, avec pour objectif de permettre la mise en place des liaisons ADSL vers les mobiles. Les changements intercellulaires ou handovers sont pris en charge par le système. Le réseau sans fil donnant naissance au WiMAX mobile fonctionne dans une bande avec licence située en dessous des 6 GHz.
- **IEEE 802.16m.** Ce standard définit la nouvelle génération du WiMAX (WiMAX phase 2), qui a été acceptée comme membre de la famille 4G. Ce choix redonne un peu de vie au WiMAX.

Les produits WiMAX fixe et WiMAX mobile sont décrits à l'annexe I.

### IEEE 802.22

Une nouvelle initiative soutenue par de nombreux industriels dans le domaine des réseaux régionaux concerne les WRAN (Wireless Regional Area Network).

Cette norme, dont l'étude a démarré en 2005, a été finalisée en 2011. Elle a pour objectif d'utiliser les bandes blanches de la télévision, c'est-à-dire les canaux de télévision non utilisés. Les fréquences choisies étant entre 54 et 862 MHz, les portées peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres et permettre de diffuser des applications de types télévision interactive, jeux vidéo interactifs ou vidéo à la demande sur des ordinateurs portables en mobilité.

Les techniques sous-jacentes sont très innovantes, avec l'utilisation de radios cognitives (que nous décrivons à la fin de ce chapitre), permettant de déterminer, pour un terminal donné, sa direction d'émission, sa puissance et la fréquence à utiliser. Pour cela, une base de données centrale doit être capable de répondre à une requête de l'antenne pour lui indiquer la fréquence à utiliser. Cette solution permet de démultiplier l'utilisation spectrale.

Si l'on considère qu'une antenne peut espérer disposer de 200 MHz de bande passante en dessous de 1 GHz, c'est-à-dire pour les ondes pénétrant dans les bâtiments, comme la télévision, il est évident que cette nouvelle technologie régionale va concurrencer les opérateurs déjà installés. Une seule antenne pourrait, avec les 200 MHz disponibles, permettre, sur 20 à 30 kilomètres, de regrouper 30 000 télévisions interactives ou l'équivalent d'un million de téléphones portables. Nous donnons quelques caractéristiques supplémentaires de ces réseaux à l'annexe I.

## Les réseaux de mobiles

Les réseaux de mobiles se caractérisent par la mobilité du terminal. Pour réaliser cette mobilité, le réseau se compose de cellules, constituées par les espaces géographiques couverts par une antenne. Le système est alors capable de gérer des changements intercellulaires, c'est-à-dire le passage d'une cellule à une autre, ou encore le changement d'antenne.

Cette section examine les différentes générations de réseaux de mobiles, en partant de la première, entièrement analogique, pour atteindre la quatrième, totalement numérique et nativement IP. La cinquième génération est en gestation ; les quelques premiers éléments qui en sont connus sont présentés à la fin de ce chapitre.

Cette section ne fait que présenter les différentes générations de réseaux de mobiles. Le chapitre 18 permettra de découvrir les caractéristiques techniques de ces réseaux de mobiles.

### Génération 1G

La première génération de réseaux de mobiles est apparue à la fin des années 1970. Elle définit un réseau cellulaire, c'est-à-dire composé de cellules, ou zones géographiques, limitées à quelques kilomètres, qui recouvrent le territoire de l'opérateur (*voir figure 10.10*). Ces cellules se superposent partiellement pour assurer une couverture

complète du territoire cible. Le mobile communique par le biais d'une interface radio avec l'antenne centrale, qui joue le rôle d'émetteur-récepteur de la cellule. Cette interface radio utilise des bandes de fréquences généralement spécifiques du pays dans lequel est implanté le réseau. L'émission des données sur l'interface radio est effectuée en analogique. Cette première génération ne pouvait avoir que relativement peu de succès, étant donné le fractionnement des marchés.

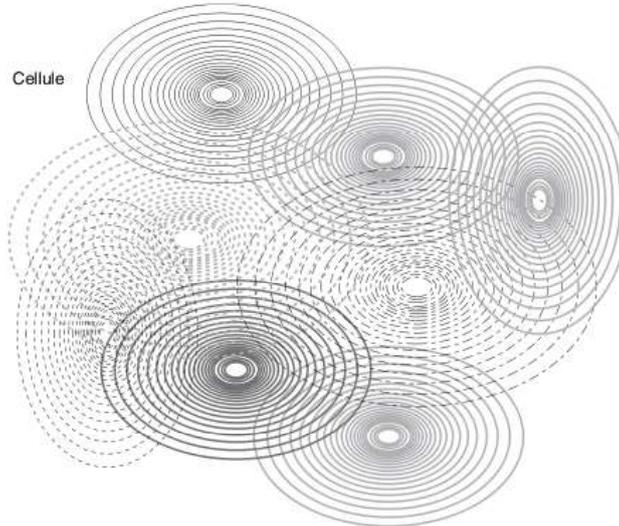


Figure 10.10

*Réseau cellulaire*

La première génération utilise la technique d'accès FDMA (Frequency Division Multiple Access), qui consiste à donner à chaque utilisateur qui le demande une bande de fréquences dans la cellule où il se trouve afin de permettre l'émission et la réception des informations entre le mobile et l'antenne de la cellule. Lorsque le mobile sort de la portée de sa cellule, une autre bande de fréquences, qui correspond à la nouvelle cellule, lui est affectée. La bande précédente est libérée et réaffectée à un autre utilisateur. La réutilisation des bandes de fréquences dans un maximum de cellules du réseau constitue l'un des problèmes majeurs posés par les systèmes cellulaires.

Comme pour les autres générations, la taille de la cellule dépend de la fréquence utilisée. Plus la fréquence est élevée, moins la portée est importante. Au départ, les fréquences utilisées allaient de 30 à 300 MHz dans les bandes UHF (Ultra-High Frequency) puis augmentaient dans les bandes VHF (Very High Frequency) de 300 MHz à 3 GHz. On utilise aujourd'hui des gammes de fréquences jusqu'à 20 GHz.

## Génération 2G

En 1982, la CEPT (Conférence européenne des Postes et Télécommunications) a décidé de normaliser un système de communication mobile dans la gamme des 890-915 MHz et 935-960 MHz pour l'ensemble de l'Europe. Deux ans plus tard, les premiers grands choix étaient faits, avec, en particulier, un système numérique. Le groupe spécial mobile, ou GSM, a finalisé en 1987 une première version comportant la définition d'une interface radio et le traitement de la parole téléphonique.

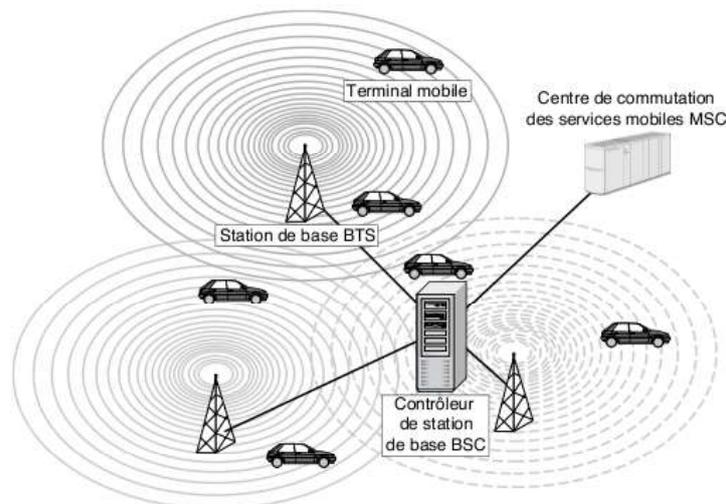
Avec une autre version dans la gamme des 1 800 MHz, le DCS 1800 (Digital Cellular System), la norme GSM a été finalisée au début de l'année 1990. Cette norme est complète et comprend tous les éléments nécessaires à un système de communication numérique avec les mobiles. Il existe d'autres normes pour cette deuxième génération, comme l'IS-95 ou l'IS-136, mais elles sont fragmentaires et ne concernent généralement que l'interface radio.

Dans un système GSM, la station mobile comprend deux parties : l'équipement mobile, qui permet la communication radio, et le module d'identification, qui contient les caractéristiques identifiant l'abonné. Le réseau est découpé en cellules, qui possèdent chacune une station de base, ou BTS (Base Transceiver Station). Cette dernière s'occupe des transmissions radio sur la cellule. Associés à la station de base, des canaux de signalisation permettent aux mobiles de communiquer avec la BTS et *vice versa*. Chaque station de base est reliée à un contrôleur de station de base, ou BSC (Base Station Controller). Cette architecture est illustrée à la figure 10.11.

Le réseau lui-même contient un commutateur, ou MSC (Mobile services Switching Center), qui communique avec les différents systèmes radio, un enregistreur de localisation nominal, ou HLR (Home Location Register), qui est une base de données de gestion des mobiles, et un enregistreur de localisation des visiteurs, ou VLR (Visitor Location Register), qui est une base de données des visiteurs dans une cellule. Le système GSM comporte également des mécanismes de sécurité.

En ce qui concerne le mode d'accès, c'est la technique TDMA (Time Division Multiple Access), dans laquelle le temps est découpé en tranches, qui est employée. Une seule station peut accéder à une tranche donnée. Par canal radio, le découpage est effectué en huit tranches d'une durée de 0,57 ms. La parole est compressée sur une bande de 22,8 kHz, qui inclut un codage permettant la correction des erreurs. En Amérique du Nord, un système assez similaire, l'IS-54 (Interim Standard) a été développé. Il utilise également le TDMA. Sa vitesse de transmission peut atteindre 48,6 Kbit/s.

La norme DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) concerne plutôt les autocommutateurs téléphoniques, ou PABX (Private Automatic Branch eXchanger) sans fil. Dans quelques années, les autocommutateurs privés seront atteints par voie hertzienne. Les cellules seront alors très petites et les bandes assez facilement réutilisables à courte distance. Pour ces dernières normes, on parle de téléphonie mobile de proximité. Il faut rester sur la même borne durant toute la communication, ce qui implique de tout petits déplacements puisque les cellules sont minuscules.

**Figure 10.11**

*Architecture d'un réseau de mobiles*

Le réseau cœur du réseau de mobiles permet l'interconnexion des différents MSC, c'est-à-dire des commutateurs qui permettent aux contrôleurs de stations de base de communiquer entre eux. Dans la deuxième génération de mobiles, le réseau cœur est de type circuit. En d'autres termes, une communication entre deux machines s'effectue par un circuit. La différence avec un réseau de troisième génération réside dans le réseau cœur, qui passe d'une commutation de circuits à un transfert de paquets.

Un système intermédiaire, dit 2,5G, se place entre la deuxième et la troisième génération. Il consiste en un double réseau cœur incluant un réseau circuit pour la parole téléphonique et un réseau paquet pour le transfert des données. Le GPRS (General Packet Radio Service) puis EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution) font partie de cette génération intermédiaire.

### Génération 3G

La troisième génération s'est implantée au tournant des années 2000 avec un très fort déploiement à partir de 2005. Sa normalisation s'est effectuée principalement sous l'égide de l'UIT-T, sous le nom d'IMT 2000, et du 3GPP. La première ouverture a été celle de NTT DoCoMo au Japon en octobre 2001.

La différence la plus sensible avec la deuxième génération concerne l'introduction du mode paquet à l'exception de la parole téléphonique, qui reste très semblable à celle du

GSM. Toutes les informations, en dehors de la parole, sont mises dans des paquets et transportées dans un réseau à transfert de paquets.

L'augmentation des débits est assez importante par rapport au GSM, qui plafonne à 9,6 Kbit/s, puisqu'elle atteint 384 Kbit/s dans les services commercialisés lors de la première génération de l'UMTS. Cependant, au démarrage de l'UMTS la partie du spectre dédiée à la troisième génération étant relativement faible, il ne fallait pas compter sur de très hauts débits en période fortement chargée.

Le codage numérique qui est utilisé pour le transport de la parole permet un débit de 8 Kbit/s. L'image animée est véhiculée par le biais d'une compression MPEG-2 ou MPEG-4. Plusieurs types de modulations ont été étudiés pour l'émission numérique du signal. Il s'agit d'extensions des modulations classiques en fréquence, en amplitude et en phase. L'accès au canal radio utilise les techniques FDMA, TDMA et CDMA.

FDMA et TDMA sont déjà utilisés dans la génération précédente et dans les réseaux satellite, mais avec l'inconvénient que la réutilisation des canaux radio dans des cellules connexes peut donner lieu à un brouillage. La méthode principale pour la troisième génération est le CDMA. Les mobiles d'une même cellule se partagent un canal radio par des techniques d'étalement de spectre. Le système alloue un code unique à chaque client, ce code étant utilisé pour étaler le signal dans une très large bande passante,  $B$ , par rapport à la bande du signal utile,  $R$ . Plus le rapport  $B/R$  est important, plus le nombre d'utilisateurs potentiel augmente. L'avantage de cette méthode est la réutilisation des mêmes fréquences dans des cellules connexes.

La technique ATM a été adoptée dans un premier temps du fait de sa forte compatibilité avec le réseau fixe et pour la gestion des ressources. Aujourd'hui, on utilise des réseaux de type MPLS avec de la commutation Ethernet. La mobilité du terminal est assurée par des solutions normalisées par le 3GPP dans lesquelles l'intelligence est assez présente. Le débit des terminaux vers le réseau dans la première génération de l'UMTS reste relativement limité, avec 384 Kbit/s sur la voie montante, mais permet à l'utilisateur d'accéder à de premiers services multimédias.

#### Génération 3,5G

Une génération intermédiaire entre la 3G et la 4G s'est mise en place avec des extensions de l'UMTS et une augmentation des débits. Cette génération intermédiaire est illustrée par les solutions HSDPA, HSUPA et LTE. La commercialisation de HSDPA a démarré en 2006 et celle de HSUPA fin 2008.

HSDPA et HSUPA font entrer les mobiles dans l'univers des réseaux de données. Cette génération s'illustre par la mise en place de l'IMS (IP Multimedia Subsystem), que nous examinons en détail au chapitre 19. L'IMS est également classé au niveau terrestre comme faisant partie du NGN (Next Generation Network), qui représente la convergence fixe/mobile, dans laquelle les services sont accessibles aussi bien à partir de terminaux fixes que de terminaux mobiles.

La génération de l'IMS utilise de nombreux protocoles du monde Internet, dont le plus important est sûrement SIP (Session Initiation Protocol). La téléphonie devient de la téléphonie sur IP (ToIP).

Le LTE (Long Term Evolution), ou release 8 de l'UMTS, a démarré sa commercialisation au début de 2010 en Suède. C'est l'évolution la plus aboutie de l'UMTS et presque de la 4G. Cependant, elle reste classée en 3G+ puisque la parole téléphonique des opérateurs n'est toujours pas en mode IP. On peut cependant réaliser de la téléphonie sur IP avec le VoLTE, qui utilise la voie de données du réseau. C'est le passage au tout IP qui marque la 4G. Le débit crête du LTE peut atteindre 100 Mbit/s sur la voie descendante et 50 Mbit/s sur la voie montante.

La 3G a également introduit le principe du numéro unique. Le propriétaire de ce numéro peut l'utiliser sur tous les équipements, après, bien sûr, une authentification. En d'autres termes, l'utilisateur d'un équipement terminal porte avec lui son abonnement et l'utilise, avec les contraintes liées à l'équipement terminal, dans les conditions les plus diverses compatibles avec son abonnement. Une autre utilisation potentielle pour un individu muni de deux abonnements, un personnel et un professionnel, consiste à se faire appeler où qu'il soit dans le monde, sur l'un ou l'autre numéro. Selon la tonalité de la sonnerie, il peut savoir si l'on appelle son numéro privé ou celui de son entreprise.

### Génération 4G

La quatrième génération est de nouveau une révolution pour les réseaux hertziens par sa totale compatibilité avec le monde IP, de telle sorte qu'il n'y a plus aucune différence entre un réseau fixe et un réseau de mobiles.

Toutes les applications sont traitées avec le protocole IP, même la parole téléphonique. Quoique l'on classe parfois le LTE dans la quatrième génération, cette génération démarre avec le LTE Advanced. Les débits sont du même ordre de grandeur que dans le LTE. Les applications M2M (Machine to Machine) font partie de la 4G ainsi que toutes celles que l'on trouve aujourd'hui sur l'Internet fixe.

Le problème du manque de fréquences est résolu par l'utilisation de cellules de tailles différentes selon l'environnement et les débits demandés. Dans les zones très denses, il est possible d'utiliser des cellules de toute petite taille, capables d'apporter à chaque machine terminale un débit de plusieurs mégabits par seconde avec des débits crête beaucoup plus élevés.

Ces picocellules ont une portée de quelques dizaines de mètres au maximum. Pour des zones un peu moins denses, une ville avec moins de bureaux, par exemple, des micro-cellules de quelques centaines de mètres de diamètre sont adoptées. Des cellules plus grandes, dites cellules parapluie, se superposent aux précédentes pour résoudre les problèmes de grande mobilité.

La quatrième génération introduit à la fois le très haut débit et le « multi-homé », c'est-à-dire la possibilité de se connecter sur plusieurs réseaux simultanément. Un même flot peut-être décomposé en plusieurs sous-flots transitant par des réseaux différents, afin

d'augmenter la vitesse globale de la transmission. La quatrième génération peut également permettre à différents flots de partir chacun par son propre réseau. Le terminal doit donc être capable de détecter tous les réseaux qui sont autour de lui et de choisir pour chacune de ses applications le meilleur réseau à utiliser.

### Génération 5G

La cinquième génération est seulement à l'étude, et bien des éléments peuvent encore changer avant de parvenir à un standard. L'idée principale est d'utiliser des plates-formes en altitude. Deux catégories se détachent : les plates-formes à basse altitude, comme des ballons à quelques centaines de mètres au-dessus du sol, et les plates-formes à haute altitude, à une vingtaine de kilomètres. Suivant les pays, de telles solutions ne sont pas envisageables à cause du danger d'avoir plusieurs tonnes de matériels au-dessus de la tête des habitants. Les premières expérimentations ont lieu dans des pays peu peuplés et en général défavorisés pour l'accès à Internet. On peut citer le réseau Loom de Google, dont le but est de raccorder plusieurs dizaines de millions d'habitants de l'hémisphère Sud, et plus particulièrement d'Afrique. Nous retrouverons cette 5G plus en détail au chapitre 18.

### La radio cognitive et les avancées technologiques

Le mode du sans-fil progresse à une vitesse vertigineuse. On pensait avec les hauts débits relatifs de la 3G+ que l'on ne pourrait plus vraiment progresser. Il n'en est rien. On compte encore gagner entre 2010 et 2020 un ordre de grandeur de 1 000 ! Là où les réseaux hertziens proposent actuellement des débits de 1 Mbit/s, on atteindra dans dix ans 1 Gbit/s. Cette augmentation prodigieuse a pour origine la radio cognitive et plusieurs autres avancées technologiques de premier plan.

Le premier concerne l'utilisation du spectre. Entre 0 et 20 GHz, il est d'environ 10 %, mais, à l'intérieur des bâtiments, il est encore nettement inférieur, entre 2 et 4 %. Ce spectre, que l'on disait saturé, l'est en fait très peu. Cependant, il est complètement licencié, c'est-à-dire que toutes les fréquences ont un propriétaire légal. La figure 10.12 illustre l'utilisation du spectre en cours de journée dans un cas standard. Certaines fréquences sont fortement utilisées, comme celles achetées par les opérateurs de télécommunications, qui les utilisent au mieux grâce à d'excellentes techniques de multiplexage, comme le CDMA.

L'objectif de la radio cognitive est d'utiliser au mieux le spectre de fréquences en transmettant sur les fréquences non utilisées par leur possesseur. La réglementation est en cours de discussion aussi bien à l'intérieur de chaque pays que chez les organismes de normalisation comme l'IEEE (IEEE P1900).

L'idée de base est illustrée à la figure 10.13. Le point d'accès cognitif écoute la porteuse du signal primaire. Dès que celle-ci est libérée, il émet sur cette porteuse. Lorsque le signal primaire revient, le point d'accès cognitif s'arrête de transmettre. Ces techniques sont aujourd'hui au point, et de nombreux essais en ont montré l'efficacité. Il reste des points importants à améliorer, comme la présence de deux points d'accès cognitifs

simultanément, qui entrent en compétition pour émettre en premier. Plusieurs propositions de techniques d'accès ont été déposées, mais aucune n'est encore normalisée.

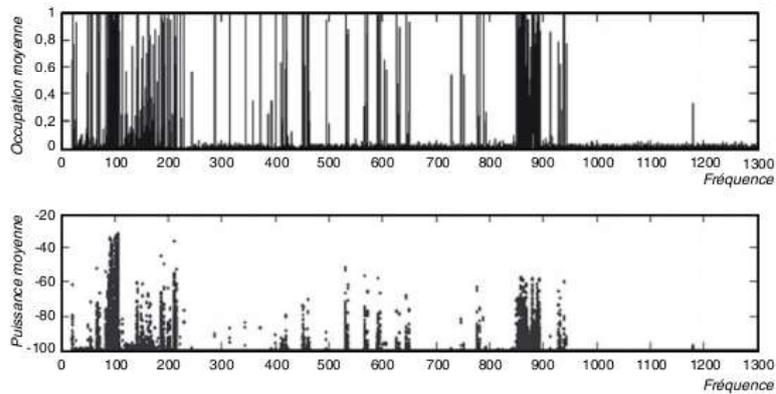


Figure 10.12

Utilisation des fréquences entre 0 et 1,3 GHz

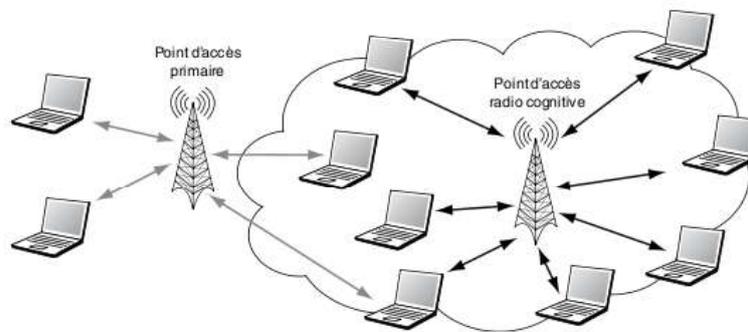


Figure 10.13

Exemple de points d'accès en radio cognitive

D'autres solutions vont permettre d'augmenter fortement les débits, comme les antennes directionnelles, ou *beamforming*. Ces antennes permettent d'émettre simultanément des flots différents dans plusieurs directions spatiales. L'avantage est bien sûr d'augmenter le débit en le multipliant par le nombre de directions. De plus, cette solution permet une

bien meilleure réutilisation d'une même fréquence. La réutilisation des fréquences par des antennes directionnelles est illustrée à la figure 10.14.

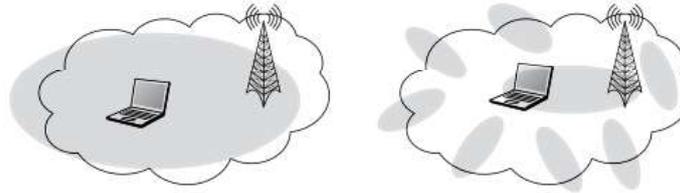


Figure 10.14

Réutilisation des fréquences par des antennes directionnelles

### La boucle locale satellite

Trois catégories de systèmes satellitaires ont été définies sous les noms de LEOS, MEOS et GEOS (Low, Medium et Geostationary Earth Orbital Satellite). Les satellites sont situés respectivement à environ 1 000, 13 000 et 36 000 km de la Terre. Les deux premières catégories concernent les satellites défilants, et la dernière les satellites qui semblent fixes par rapport à la Terre.

Les distances à la Terre des différentes catégories de systèmes satellitaires sont illustrées à la figure 10.15. Lorsque les satellites sont défilants, il faut plusieurs satellites les uns derrière les autres pour couvrir un point de la Terre. C'est ce que l'on appelle une constellation.

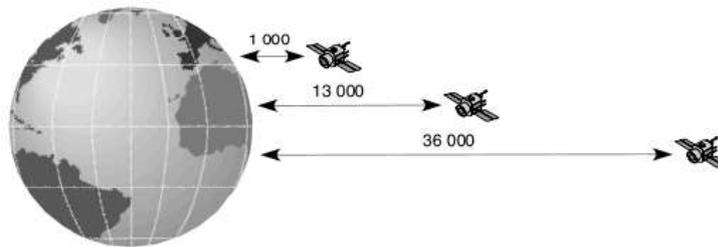


Figure 10.15

Distances à la Terre en kilomètre

La boucle locale satellite concerne l'accès d'un utilisateur, que ce soit une entreprise ou un particulier, au commutateur d'un opérateur employant un réseau terrestre. En d'autres termes, le satellite joue le rôle de boucle locale pour permettre à un utilisateur de se connecter à un opérateur. Cette boucle locale est destinée aux clients isolés ou qui n'ont pas la possibilité d'utiliser une boucle locale terrestre.

Les trois catégories de systèmes satellitaires peuvent jouer le rôle de boucle locale. Les LEOS adressent des terminaux relativement légers, ressemblant à des portables de type GSM, mais avec une antenne un peu plus grande. Les systèmes MEOS demandent des antennes plus importantes, qui peuvent exiger une certaine mobilité sur leur socle. Les systèmes GEOS demandent des antennes fixes très importantes.

La figure 10.16 illustre la taille du spot, c'est-à-dire la zone éclairée par une antenne située sur le satellite, que l'on peut obtenir à partir des différents types de satellites. Plus le satellite est près du sol, plus la taille du spot est petite. L'avantage offert par les satellites basse orbite est la réutilisation des fréquences, qui peut atteindre 4 000 pour une constellation de satellites située à 700 km du sol.

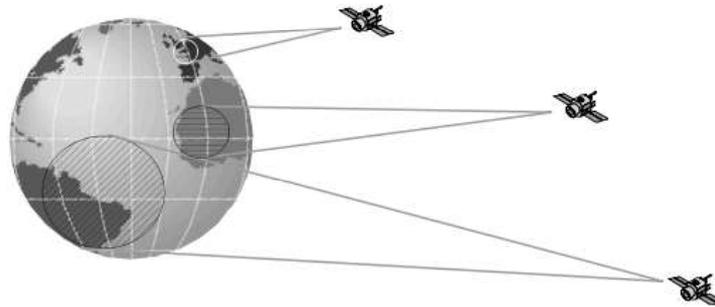


Figure 10.16

Taille des spots des différentes catégories de satellites

### Les protocoles de la boucle locale satellite

La boucle locale satellite exige des trames pour permettre aux récepteurs de retrouver les débuts et les fins des paquets transportés. Les paquets, aujourd'hui essentiellement de type IP, sont encapsulés dans des trames, qui peuvent être de type HDLC (*voir l'annexe E*), soit de type ATM, soit encore de type Ethernet. Dans ces deux derniers cas, on parle de réseau satellite ATM ou Ethernet. Un commutateur ATM ou Ethernet peut se trouver dans le satellite.

Une particularité des boucles locales satellite vient du défilement des satellites lors de l'utilisation d'une constellation. Le client doit changer de satellite au fur et à mesure du passage des satellites au-dessus de sa tête. Ce changement s'appelle un *handover* satellite.

Il est également possible que les satellites défilants aient plusieurs antennes et que le terminal de l'utilisateur ait à effectuer un handover intrasatellite.

Ces handovers peuvent être de différents types, appartenant à deux grandes catégories : les soft-handover et les hard-handover. Le soft-handover consiste à se connecter à la fois sur le satellite qui disparaît et sur celui qui apparaît. Le passage se fait alors en douceur. Dans un hard-handover, le passage s'effectue brutalement, la communication devant passer d'un satellite à l'autre sans recouvrement.

## Conclusion

Devenue une réalité depuis 2004, la boucle locale radio s'est énormément étendue en dix années. Les solutions sans fil proviennent des techniques Wi-Fi, WiMAX et WRAN. Les réseaux de mobiles sont devenus très concurrentiels dans ce domaine puisque leurs débits sont désormais comparables à ceux des réseaux sans fil.

La voie hertzienne devient le standard pour la boucle locale. Le principal problème qu'elle pose provient de la faible largeur de la bande passante disponible. Pour arriver à trouver des capacités importantes, il faut monter en fréquence et franchir les 20 GHz. Cependant, au-dessus de 20 GHz, la directivité, ajoutée à l'affaiblissement qui survient dès que les conditions ne sont pas parfaites, pose de nouveaux problèmes, à la fois techniques et de coût. D'autres solutions sont à maturité avec les antennes directives et la radio cognitive. Aussi est-il à peu près certain que la boucle locale sera à l'avenir fortement hertzienne et que les modems fixes ADSL utilisant les lignes téléphoniques seront remplacés par des modems ADSL mobiles.

Le réseau WiMAX était destiné à s'installer sur la boucle locale hertzienne. Malheureusement, pour de nombreuses raisons – opposition des opérateurs de mobiles, équipementiers sans ambition sur cette technologie... –, peu de déploiements ont été effectués à l'échelle d'un pays (Corée et Japon). Cette technologie est donc restée marginale (quelques dizaines de milliers de connexions en France). L'IEEE a essayé de pousser une nouvelle génération, appelée WiMAX phase 2, mais ses chances de succès restent très faibles du fait de l'adoption depuis 2010 du LTE (Long Term Evolution) et du LTE-Advanced à partir de 2014, qui offrent les mêmes propriétés et, surtout, sont soutenus par les grands opérateurs.

La solution WRAN (Wireless Regional Area Network), ou Wi-RAN, apporte une petite révolution en permettant, avec une seule antenne, de connecter des centaines de milliers de clients téléphoniques sur une portée de plusieurs dizaines de kilomètres. Son déploiement d'une grande simplicité pourrait séduire des opérateurs entrants. La principale difficulté sera de récupérer des fréquences avec une largeur de bande importante et surtout sous les 1 GHz pour atteindre les portées nécessaires au transport de la télévision. Les deux axes privilégiés pour cela sont le dividende numérique et l'utilisation de la radio cognitive.

## Les réseaux de domicile

---

Les réseaux de domicile forment une nouvelle catégorie de réseaux encore peu développée. Le domicile est vu par les opérateurs comme une étoile autour de la Home Gateway, qui est la « box » construite autour du modem ADSL. La nouvelle génération de réseaux de domicile devient un petit réseau d'entreprise, avec une centaine de connexions de matériels extrêmement divers provenant de trois mondes distincts : les télécommunications, l'électronique et l'informatique.

Parmi ces équipements, on trouve les téléphones avec et sans fil, offrant des fonctionnalités de vidéophonie, de téléphonie sur IP et de télévision. La haute définition et la parole de meilleure qualité que celle du GSM sont également disponibles.

Les industriels des équipements grand public de la maison proposent des télévisions, des consoles de jeu, des appareils photo et caméras ainsi que des machines à laver, réfrigérateurs, aspirateurs et futurs robots ménagers dotés d'adresses IP.

La difficulté majeure avec ces réseaux est de faire communiquer l'ensemble des équipements entre eux et avec l'extérieur. Nous détaillons dans ce chapitre les couches basses de leur architecture sous-jacente, ainsi que celles permettant à tous les équipements du domicile de s'échanger des informations.

La télésurveillance, les alarmes, les capteurs de présence forment une autre catégorie d'équipements qui doivent pouvoir être ajoutés aux réseaux de domicile pour pouvoir être jointes à distance. S'y ajoutent également les ampoules électriques et plus généralement tout ce qui est connecté au réseau électrique, comme les chaudières et pompes à chaleur.

Le but du réseau de domicile est de connecter tous les équipements du domicile pour leur permettre de communiquer avec l'extérieur et entre eux. Les problèmes à résoudre se divisent en deux grandes catégories : la connexion des équipements entre eux par le biais d'un réseau proposant un protocole acceptable par l'ensemble des machines et la gestion

des applications communes, qui, beaucoup plus qu'une connexion réseau, demandent un interfonctionnement.

## Les couches basses de l'architecture

Les couches basses de l'architecture des réseaux de domicile, concernant les éléments physiques, les trames et les paquets, sont fondées essentiellement sur Ethernet, que ce soit sous forme hertzienne, courant porteur ou câblée. Ces trois supports se partagent en fait les connexions des équipements du domicile.

Les courants porteurs en ligne forment une catégorie importante des réseaux de domicile.

### Le CPL

L'utilisation des courants porteurs en ligne, ou CPL, dans le domaine du domicile est aujourd'hui une réalité qui ne cesse d'attirer des clients. Les distances sont généralement assez faibles, de l'ordre de quelques mètres entre les différentes prises.

L'objectif est de réaliser sur l'ensemble des câbles électriques d'une même habitation un réseau partagé, de telle sorte qu'un message émis par un client par l'intermédiaire de sa prise électrique puisse être capté par l'ensemble des prises électriques de l'habitation. Le tableau électrique n'offrant qu'une faible protection contre la diffusion vers l'extérieur de l'habitation, il faut sécuriser les communications, comme dans les réseaux hertziens, où l'écoute est simple à réaliser.

Puisque le câble est partagé, une technique d'accès de type MAC est requise. La solution la plus souvent proposée est d'utiliser la norme Ethernet, qui permet le partage d'un câble commun. Cependant, contrairement à l'Ethernet classique, qui utilise la technique CSMA/CD comme méthode de partage, Ethernet sur courant porteur utilise la même technique que Wi-Fi c'est-à-dire le CSMA/CA. Il est en effet difficile avec la composante électrique d'écouter en même temps qu'on émet.

Le comportement de ces réseaux est similaire à celui de Wi-Fi : les performances se dégradent dès qu'une des stations subit un fort taux d'erreur en ligne l'obligeant à réduire sa vitesse d'émission. D'une vitesse brute annoncée de 200 Mbit/s dans le standard CPL HomePlug, le débit peut chuter jusqu'à 0,9 Mbit/s.

Les principaux produits pour l'environnement du domicile proviennent de la technologie HomePlug, avec les versions 1.0 turbo, Turbo, AV (Audio Video), AV2, GreenPHY et Access BPL (Broadband Power Line). Ces versions ont des débits bruts annoncés de 14, 80 et 200 Mbit/s. Comme nous l'avons indiqué, ces débits sont très fluctuants en fonction de l'environnement et peuvent chuter fortement, jusqu'à 1 Mbit/s.

Le second grand standard de fait provient de HD-PLC (High Definition PLC) qui définit une couche physique à partir de wavelets.

La normalisation s'est effectuée dans le groupe IEEE P1901 et prend pour base le HomePlug AV et le HD-PLC, ce qui donne le choix entre deux couches physiques différentes. Le nom de la norme est plus exactement BPL (Broadband over Power Line) ou

encore IEEE 1902-2010 pour indiquer la date de finalisation. Les débits montent jusqu'à 500 Mbit/s.

Dans le domicile, il est possible de mettre en place une passerelle entre le réseau CPL et les autres réseaux Ethernet. La difficulté principale de cette interconnexion réside dans l'adéquation des classes de priorités entre les différents réseaux, qui ne sont pas toujours exactement positionnés de la même façon.

La sécurité de l'information qui transite sur ce réseau constitue également un problème. Le courant faible peut traverser le compteur électrique, même en présence de filtres spécialisés. Il faut donc chiffrer l'information avec une clé, par exemple la clé NEK (Network Encryption Key) de HomePlug, et implémenter cette clé sur l'ensemble des équipements au moyen d'un logiciel de configuration spécifique. Des équipements de type routeur, passerelle, gestion des NAT sont également indispensables. Ils sont très similaires à ceux des réseaux Wi-Fi.

#### Caractéristiques

La technologie CPL consiste à émettre des signaux sur le support physique qui transporte l'électricité. De nombreuses implémentations ont été effectuées depuis les années 1950, comme le relevé de compteur à distance et les applications de domotique à bas débit. Les communications CPL à haut débit sont beaucoup plus récentes.

Deux catégories de réseaux CPL doivent être distinguées : le CPL pour réaliser une communication sur la boucle locale et permettre à un utilisateur d'accéder à Internet à haut débit, d'une part, et la transmission de données sur un réseau électrique privé correspondant à un domicile, une entreprise ou au cabinet d'une profession libérale, d'autre part. La première catégorie n'a eu que peu de succès jusqu'à présent pour les hauts débits, compte tenu de la difficulté de traverser un ensemble d'équipements électriques ou de les contourner. Dans ce chapitre, nous ne nous intéressons qu'au CPL dans l'environnement privé. La partie boucle locale a été examinée au chapitre 9, en particulier avec le standard G3-PLC.

Dans l'environnement du réseau de domicile, le câble électrique correspond à un support à accès multiple et en diffusion, c'est-à-dire qu'un émetteur connecté au câble voit son signal diffusé sur l'ensemble du câble. Le câble électrique se comporte comme un réseau Ethernet, et plus précisément comme un réseau Wi-Fi. On retrouve donc exactement les caractéristiques d'un réseau Wi-Fi, avec sa technique d'accès et les difficultés d'y apporter de la qualité de service, une forte sécurité et des performances.

La technique d'accès CSMA/CA est en tout point identique à celle de Wi-Fi. La qualité de service est apportée par un ensemble de quatre classes de clients qui permettent, comme dans IEEE 802.11e, de privilégier certains flots par rapport à d'autres. La priorité s'exerce par le biais de temporisateurs de reprise plus ou moins longs en fonction de la classe de priorité. Cette solution n'est pas complètement efficace lorsque le réseau est saturé puisque les temporisateurs de reprise sont nombreux.

En fonction des interférences électriques, le débit brut peut décroître sans que l'utilisateur puisse le savoir, si ce n'est par le temps plus long nécessaire à la récupération d'un fichier. Le débit brut moyen est très difficile à estimer puisqu'il dépend du bipoint en

communication. À chaque trame émise correspond une vitesse brute, de telle sorte qu'il faut faire une moyenne des débits bruts en tenant compte du temps de transmission de chaque trame. Pour un réseau qui posséderait deux bipoints, c'est-à-dire quatre stations communiquant deux à deux, l'une à 100 Mbit/s et l'autre à 1 Mbit/s, il faut cent fois plus de temps pour émettre une trame entre le bipoint lent par rapport au bipoint rapide. En moyenne, le débit n'est donc que très légèrement supérieur à 1 Mbit/s. On peut estimer qu'un réseau CPL a un débit brut moyen à peu près égal à celui du bipoint le plus lent.

Pour éviter cet effondrement des performances, les dernières normalisations intègrent des technologies de partage, comme le TDMA, qui limitent fortement la chute de débit engendrée par les bipoints de mauvaise qualité.

Comme dans les réseaux Wi-Fi, le débit réel est très inférieur au débit brut. On peut estimer de façon très simplifiée que le débit réel est le tiers du débit brut. Si l'on prend l'exemple de la technologie HomePlug, qui possède six générations, 1.0, turbo, AV (Audio Vidéo), AV2, Green PHY et BPL, les débits bruts maximaux et les débits réels sont récapitulés au tableau 11.1.

Standard	Débit brut	Débit réel
HomePlug 1.0	14 Mbit/s	4,5 Mbit/s
HomePlug Turbo	85 Mbit/s	12 Mbit/s
HomePlug AV	180 Mbit/s	55 Mbit/s
HomePlug AV2	1 000 Mbit/s	200 Mbit/s
HomePlug Green PHY	10 Mbit/s	5 Mbit/s
HomePlug Access BPL	500 Mbit/s	100 Mbit/s

TABLEAU 11.1 • Débits réels et bruts des réseaux HomePlug

Comme nous l'avons souligné, il faut ajouter une dégradation de la vitesse brute dès que le taux d'erreur sur les communications augmente. Dans le cas de HP 1.0, les vitesses brutes se dégradent de 14 à 12,83 Mbit/s, 10,16 Mbit/s, 8,36 Mbit/s, 6,35 Mbit/s, 4,04 Mbit/s, 2,67 Mbit/s, 0,9 Mbit/s. Comme le débit réel est très inférieur au débit brut, on s'aperçoit qu'il est possible d'avoir un réseau CPL débitant moins de 500 Kbit/s si l'une des stations travaille à la vitesse dégradée de 0,9 Mbit/s.

Le CPL met en œuvre une méthode très similaire à celle de Wi-Fi pour la transmission de données dans le domaine privé (*voir le chapitre 22*). D'ailleurs les contrôleurs Wi-Fi qui connectent les points d'accès Wi-Fi peuvent également prendre en charge les réseaux CPL. Lorsqu'une des deux solutions baisse en régime, l'autre prend le relais.

La sécurité est une fonctionnalité essentielle pour mettre en œuvre un réseau CPL. Comme indiqué précédemment, les signaux peuvent traverser le compteur électrique, même en présence de filtres spécifiques. Pour éviter cet inconvénient, il suffit de chiffrer l'information de la même manière que dans Wi-Fi. De plus, le contrôleur peut contenir un serveur RADIUS pour identifier les demandes de connexion.

### Fonctionnement

Dans le domicile, le signal numérique est émis vers les équipements d'extrémité entre 3 et 148 kHz pour les réseaux bas débit et entre 1 et 30 MHz pour les réseaux haut débit. Chaque équipement dispose de sa propre adresse et peut-être commandé par l'élément émetteur.

Du fait de son rayonnement électromagnétique, le câblage électrique fonctionne comme une antenne, de telle sorte que les interférences avec les ondes radio externes peuvent devenir importantes. Dans la zone des 1 à 30 MHz, qui nous intéresse ici, les interférences avec les radioamateurs et les DRM peuvent poser problème.

Les modems CPL utilisant l'OFDM permettent de gérer approximativement les interférences en n'utilisant pas les sous-bandes correspondant à des fréquences déjà utilisées par d'autres équipements. Une technique de *notching* a été mise au point pour éteindre et allumer les sous-bandes qui interfèrent avec d'autres émissions. En temps réel, un mécanisme d'analyse du niveau du rapport signal sur bruit permet de réaliser cet algorithme d'ajout et de retrait de certaines sous-bandes de l'OFDM.

Les bandes utilisées par les principaux produits sont indiquées au tableau 11.2.

Réseaux CPL	Bande de fréquences	Nbre de porteuses OFDM
HomePlug 1.0	4,49-20,7 MHz	76
HomePlug AV	2-28 MHz	917
DS2 45 Mbit/s	1,6-30 MHz	100
DS2 200 Mbit/s	2,46-11,725 et 13,8-22,8 MHz	2560
Spidcom	2-30 MHz	900

TABLEAU 11.2 • Bandes de fréquences et porteuses des réseaux CPL

Des expériences à des fréquences beaucoup plus élevées que 30 MHz, dans les bandes Wi-Fi à 2,4 et 5,15 GHz ont permis d'obtenir des débits de l'ordre du gigabit par seconde.

Plusieurs modes d'utilisation des réseaux CPL peuvent être envisagés : maître-esclave, pair-à-pair et centralisé. Le mode maître-esclave permet à un système central, situé sur le compteur électrique, de jouer le rôle de maître par rapport aux différentes branches de l'arbre composé des câbles électriques partant de ce centre. Le système central joue le rôle de pont entre les différents brins électriques. Le mode pair-à-pair correspond à une technologie Ethernet classique dans laquelle chaque émetteur peut aller directement à chaque récepteur. Le mode centralisé est une combinaison des deux précédents, dans lequel une station maître s'occupe de la gestion et du contrôle et met en place des communications dans le mode pair-à-pair.

La version AV de HomePlug utilise la solution centralisée. La station centralisée décide des tranches de temps accordées aux différentes stations communicant en pair-à-pair. Cette solution permet d'affecter les vitesses de communication pour chaque couple d'émetteur-récepteur.

Une autre propriété importante des technologies CPL concerne l'adaptation des vitesses de transmission pour chaque station. Comme la vitesse de transmission entre un émetteur et un récepteur dépend de la qualité du support et de l'affaiblissement du signal, cette vitesse est tributaire de l'emplacement des deux stations en train de communiquer : si elles sont très éloignées et si du bruit électromagnétique perturbe le support, le débit peut être très bas, moins de 1 Mbit/s comme nous l'avons vu.

Chaque couple de stations transmet à sa propre vitesse, comme une station Wi-Fi et son point d'accès. Pour déterminer la vitesse de transmission, chaque station possède une table « Tone Map » qui indique la meilleure vitesse de transmission par rapport aux autres stations du réseau. Cette table est mise à jour en un temps variant généralement de 10 ms à une seconde.

La figure 11.1 illustre, pour HomePlug 1.0, ce champ Tone Map, qui est transmis dans les en-têtes des trames de telle sorte que chaque station qui écoute le support puisse déterminer sa vitesse de transmission.

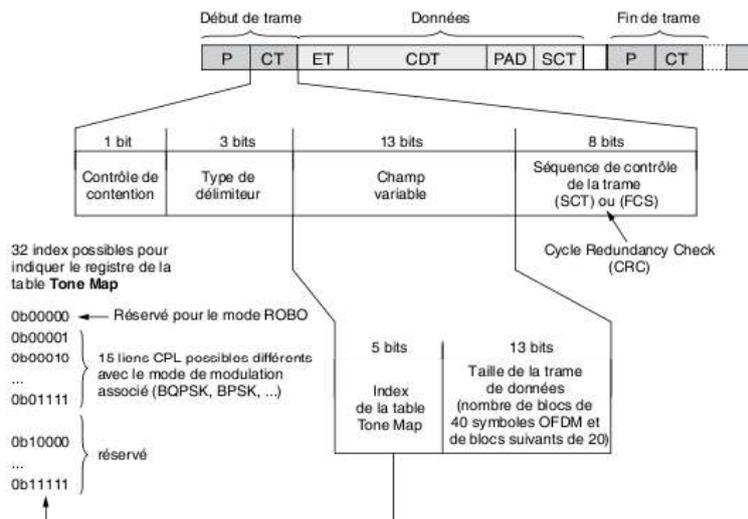


Figure 11.1

Le champ Tone Map dans HomePlug 1.0

Le champ d'indication de la vitesse sur 13 bits indique les valeurs des 15 débits possibles, ainsi que la modulation associée (DQPSK, DBPSK, etc.). Pour HomePlug AV, le nombre de liaisons est de 255 stations, et le champ tient sur 16 bits.

Le tableau 11.3 indique les différents débits de HomePlug 1.0 en fonction de la technique de modulation utilisée.

Technique de modulation	Paramètre de l'encodeur	FEC (taux de codage du code convolusionnel)	Débit PHY (Mbit/s)
DQPSK	23/39 à 238/254	3/4	14,1
DQPSK	23/39 à 238/254	1/2	9,1
DQPSK	23/39 à 238/254	3/4	4,5
ROBO (DBPSK)	31/39 à 43/51	1/2	0,9

TABLEAU 11.3 • Débits du réseau HomePlug 1.0

L'inconvénient de cette solution est qu'elle ne permet pas de déterminer avec précision la capacité du réseau CPL. On peut estimer que le débit moyen du réseau est un peu supérieur au débit de la liaison la plus lente si les débits de chaque liaison sont à peu près équivalents.

Les versions à très haut débit, comme HomePlug AV, proposent des variantes du CSMA/CA permettant d'optimiser les débits. Les affectations du support se font en TDMA pour permettre en particulier le passage d'applications de streaming et des applications temps réel comme la parole téléphonique. Certains slots TDMA sont affectés à ces applications prioritaires et d'autres sont utilisés en CSMA/CA.

Les réseaux CPL introduisent des améliorations de la qualité de service par un système identique à celui d'IEEE 802.11e consistant à déterminer la taille de la fenêtre de contention. Plus la fenêtre est petite, plus la priorité est forte. Le choix de cette fenêtre est effectué au moment de l'exécution de l'algorithme de back-off, c'est-à-dire du tirage du temporisateur de reprise.

Comme le support physique n'est pas de bonne qualité, de nombreuses erreurs se produisent. Une reprise sur erreur étant nécessaire, les acquittements sont envoyés dès la réception d'un paquet. Les protocoles ARQ (Automatic Repeat reQuest) permettent d'effectuer la retransmission. Ils emploient pour cela des paquets d'acquiescement positif et négatif ainsi que des paquets « fail », qui indiquent la non-réception du paquet pour cause de mémoire saturée ou de très mauvaise qualité du signal.

Globalement, les performances des réseaux CPL sont extrêmement variables. Malgré l'augmentation des débits bruts, le passage d'un canal de télévision haute définition n'est pas garanti sur la durée. C'est la raison pour laquelle dans le réseau de domicile on utilise un réseau maillé contenant à la fois le CPL et le Wi-Fi.

### Sécurité

Comme indiqué précédemment, on retrouve en matière de sécurité les mêmes problématiques que celles rencontrées dans le monde Wi-Fi, atténuées toutefois par le fait qu'il faut pouvoir se connecter physiquement sur le médium électrique pour l'écouter, ce qui est beaucoup plus complexe à réaliser que l'écoute d'un signal radio. Cependant, les signaux véhiculés sur le câble peuvent traverser le compteur électrique et être captés par les

voisins. Il faut donc se protéger des écoutes potentielles et des stations pirates à l'intérieur comme à l'extérieur du réseau.

Les attaques peuvent être du même genre que dans Wi-Fi : écoute, modification de l'information, utilisation non autorisée du support, etc.

Le chiffrement est une solution pour contrer les écoutes. Pour cela, il suffit que chaque station chiffre les trames émises avec une clé commune à l'ensemble des utilisateurs du réseau. Le réseau possède une clé de chiffrement, appelée NEK (Network Encryption Key), qui est transmise à l'ensemble des stations pour le chiffrement et le déchiffrement. Elle peut être transportée par deux moyens : une interface de configuration qui introduit la clé dans chaque station ou l'interface électrique, chaque équipement possédant une clé DEK (Default Encryption Key).

L'authentification des équipements entre eux s'effectue à l'aide de la clé NEK. En l'absence de cette clé, la communication n'est pas possible entre équipements non identifiés. Certains réseaux CPL peuvent avoir des fonctions plus évoluées en utilisant également l'adresse MAC pour l'authentification.

L'intégrité des échanges peut être assurée par une signature électronique, qui empêche un attaquant de modifier les informations transportées.

D'autres solutions, comme les contrôleurs ou l'utilisation de cartes à puce et de VPN, peuvent s'ajouter aux fonctions de sécurité proposées par les équipementiers.

Un contrôleur est un équipement par lequel transitent toutes les communications et qui contient un serveur d'authentification ainsi que des fonctions de sécurisation des communications. Un filtre applicatif peut contrôler les applications échangées et détruire certaines trames non reconnues. Le contrôleur peut accélérer certains flots et en ralentir d'autres, jusqu'à éliminer les trames non désirées. Le filtre applicatif peut également jouer un rôle pour la qualité de service en ralentissant les communications entre certains bipoints relativement lents.

L'inconvénient de ce système est qu'il implique une double transmission entre un point et un autre point, de l'émetteur vers le contrôleur et du contrôleur vers le destinataire. Cet intermédiaire peut ralentir le débit, mais il peut également, de façon assez inattendue, l'accélérer. En effet, si le bipoint émetteur-récepteur est éloigné, la vitesse peut être très faible du fait d'un fort affaiblissement. Si un contrôleur intermédiaire permet de retransmettre à une vitesse beaucoup plus grande, il y a un gain évident.

Les cartes à puce peuvent intégrer les mots de passe et les certificats nécessaires pour une authentification de plus haut niveau. Enfin, l'utilisation de VPN (Virtual Private Network) est recommandée lorsque la communication sort du réseau pour aller vers un site distant.

Les VLAN (Virtual LAN) permettent de définir des réseaux locaux virtuels et donc de séparer les trafics. En règle générale, cette séparation est réalisée par l'utilisation de plusieurs clés NEK. Les sous-réseaux virtuels peuvent être interconnectés entre eux par un pare-feu ou un contrôleur. Cette fonctionnalité permet, par exemple, d'intégrer un réseau CPL dans un réseau d'entreprise.

### La normalisation

La normalisation des réseaux CPL est menée aujourd'hui principalement par l'IEEE. Plusieurs groupes ont été formés, dont le plus important est P1901.

L'IEEE a créé des groupes de travail pour normaliser les réseaux courant faible sur courant fort. Ces groupes sont les suivants :

- IEEE P1575 (Standard for Broadband over Power Line Hardware), qui s'occupe de la normalisation des installations et de la sécurité du réseau.
- IEEE P1775 (Powerline Communication Equipment-Electromagnetic Compatibility Requirements-Testing and Measurement Methods), qui s'est focalisé sur les rayonnements électromagnétiques et la compatibilité avec les autres équipements radio. Ce groupe a également édicté les mécanismes à utiliser pour effectuer des mesures et des tests sur ces réseaux électriques.
- IEEE P1901 (Standard for Broadband over Power Line Networks Medium Access Control and Physical Layer Specifications), qui avait pour objectif de réaliser une normalisation effective d'un réseau CPL. Tous les principaux groupes qui ont travaillé dans le domaine sont présents, comme l'Alliance HomePlug, OPERA, UPA et CEPCA. Ce standard s'intéresse uniquement aux hauts débits, de 200 Mbit/s, 500 Mbit/s et 1 Gbit/s.

Un standard préliminaire a été approuvé à la fin de 2009 et publié au début de 2010. L'acceptation finale date de fin 2010. Deux niveaux physiques ont été définis, un utilisant une modulation OFDM, provenant de la technique HomePlug, et un second utilisant une modulation fondée sur les wavelets. Ces supports physiques sont optionnels. L'implémentation d'un seul support est acceptable, mais comme les deux solutions sont incompatibles, les utilisateurs doivent faire un choix.

### Les principaux produits CPL

Les débits des principaux produits sont illustrés à la figure 11.2.

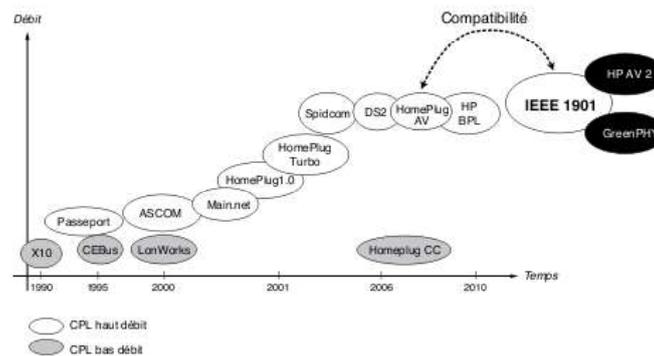


Figure 11.2

Débits des principaux produits CPL

### HomePlug

Un réseau HomePlug est constitué de cartes coupleurs reliées aux prises de courant électrique. Une trame de type Ethernet est utilisée, mais avec plusieurs modifications afin de tenir compte des contraintes des réseaux électriques.

Nous retrouvons dans ce réseau des caractéristiques similaires à celles des réseaux hertziens, en particulier IEEE 802.11. Les cartes coupleurs s'adaptent à l'environnement électrique en adoptant quatre vitesses différentes. Si le bruit électromagnétique est trop important et perturbe la qualité de la communication, le système dégrade sa vitesse pour continuer à transmettre avec un taux d'erreur acceptable par l'utilisateur. La vitesse de base du réseau, de 14 Mbit/s, se dégrade par palier jusqu'à moins de 1 Mbit/s. Les cartes coupleurs se calent sur la vitesse correspondant au bipoint.

La structure de la trame HomePlug est illustrée à la figure 11.3. Des classes de clients travaillent suivant une priorité indiquée dans l'en-tête de la trame.

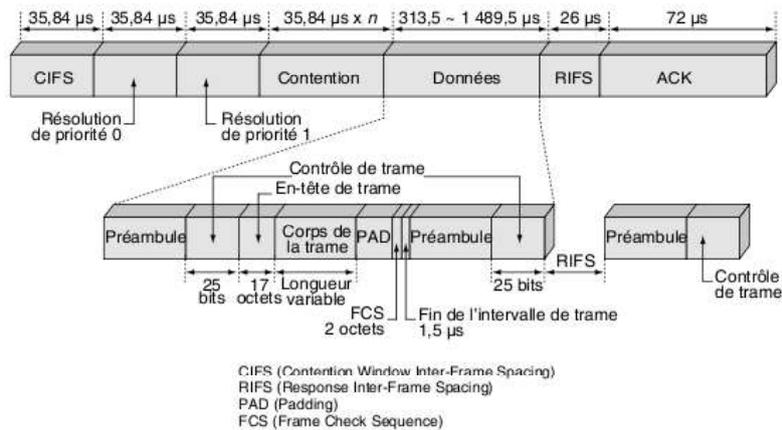


Figure 11.3

Structure de la trame HomePlug

Cette structure de trame est suffisamment complexe pour prendre en charge toutes les caractéristiques de ce réseau.

À partir de la version HomePlug AV le réseau intègre de nouvelles améliorations sur le contrôle et la technique d'accès. En particulier, ce standard intègre un gestionnaire de connexion (Connection Manager) et un coordinateur central, qui rendent la gestion maître-esclave compatible avec les versions HomePlug précédentes. Ils optimisent en outre l'utilisation des bipoints ainsi que les tranches de temps provenant du TDMA introduites dans cette version. Les versions les plus élaborées AV2, BPL et Green PHY

permettent d'améliorer les débits à 200 et 500 Mbit/s et de réduire fortement la consommation électrique, mais en réduisant en ce cas drastiquement les débits à 10 Mbit/s.

### Les réseaux hertziens

L'utilisation des méthodes hertziennes s'est propagée avec Wi-Fi, mais de nombreux autres réseaux hertziens ont vu le jour, notamment UWB (Ultra Wide Band) et WiGig, le Wi-Fi personnel.

Ces réseaux étant présentés en détail aux chapitres 21 et 22, nous ne donnerons ici que des informations complémentaires utiles aux réseaux de domicile.

#### Wi-Fi

Wi-Fi est une excellente solution dans le domicile, mais il ne va pas sans un certain nombre de défauts, notamment en raison de son succès.

Dans une grande ville d'un pays développé, il est classique de détecter, en un point donné, une dizaine de réseaux Wi-Fi, voire beaucoup plus. Comme indiqué au chapitre 22, il n'est possible de choisir que trois fréquences réellement utilisables simultanément. Il existe donc de fortes interférences entre les réseaux Wi-Fi. De ce fait, il n'est pas rare, même avec un débit brut de plus de 100 Mbit/s, qu'un utilisateur ne dispose que d'un débit très bas, en dessous de 1 Mbit/s, du fait d'interférences électromagnétiques.

De plus, certains utilisateurs sont équipés de plusieurs points d'accès, ce qui complique encore l'ingénierie à mettre en œuvre. Il faut dans ce cas modifier non seulement le plan de fréquences, mais la puissance d'émission, comme cela se fait dans les entreprises.

Une solution, qui pourrait devenir un standard dans les réseaux de domicile consiste à implanter Wi-Fi dans chaque prise de courant électrique ou au moins dans une prise de courant de chaque pièce. Cela permet de réduire la taille des cellules et de limiter leur puissance, mais ce n'est pas toujours possible avec les points d'accès bon marché.

Une autre solution pour obtenir un débit et une couverture convenables consiste à adopter l'IEEE 802.11n ou l'IEEE 802.11ac, qui offrent des débits raisonnables, même en cas de forte demande, ou les réseaux mesh.

Du fait des interférences, il faut que les utilisateurs abaissent la puissance d'émission de leur point d'accès, ce qui présente l'inconvénient de réduire la portée. La solution à ce problème consiste à placer des bornes relais (ou bridges), qui communiquent entre elles en Wi-Fi ou par le biais du réseau électrique ou d'un réseau Ethernet spécifique. Les bornes relais servent à la fois de point d'accès et de relais, permettant aux clients de se connecter et de jouer le rôle d'un réseau mesh (voir le chapitre 23). En d'autres termes, dans le futur, les domiciles seront couverts par un ensemble de points d'accès reliés entre eux par des liaisons radio.

#### Autres solutions

De nombreuses autres solutions pourraient être adaptées à l'univers de la maison, à commencer par un réseau Ethernet standard avec un câblage spécifique. Cette solution est utilisée par de nombreux particuliers en raison de son efficacité. Les domiciles neufs

pourraient disposer directement d'un câblage Ethernet dans les murs, mais c'est rarement le cas.

Le réseau Ethernet peut aussi utiliser le câblage téléphonique du domicile. Cette solution n'est toutefois pas toujours satisfaisante, car ces câbles sont de très mauvaise qualité et sont perturbés par les courants de sonnerie.

Une technique potentiellement intéressante, appelée FSO (Free Space Optics), utilise l'infrarouge et est limitée à une pièce. Le réseau se sert de l'électricité et des ampoules pour la diffusion de l'infrarouge.

Un câblage en fibre optique peut être réalisé dans un domicile en continuité de celui d'un opérateur. Cette solution est examinée avec soin actuellement, mais son coût est important, et elle demande la mise en place d'étoiles optiques supplémentaires, ce qui pose des problèmes d'atténuation du signal optique.

Plusieurs solutions pour raccorder des capteurs sont également envisagées, comme l'utilisation de ZigBee ou l'une des propositions du groupe 6LowPAN de l'IETF. L'implémentation de nombreux capteurs devrait permettre de suivre les personnes dans la maison afin d'éteindre ou allumer automatiquement les lumières, de détecter des effractions et de gérer des éléments de sécurité (capteur d'incendie) ou de confort (capteur de température).

Dernière solution en date, le WiGig, qui, porté par une alliance de nombreux grands constructeurs, la Gigabit Wireless Alliance, pourrait avoir son mot à dire, surtout par sa compatibilité Wi-Fi et son très haut débit de 6 Gbit/s.

En résumé, on peut voir le réseau de domicile comme un double réseau Wi-Fi- CPL, comme illustré à la figure 11.4. Ce réseau possède des bridges pour passer d'un réseau à l'autre et introduire le maillage. Si l'un des réseaux, ou une partie de réseau, pose problème on utilise l'autre.

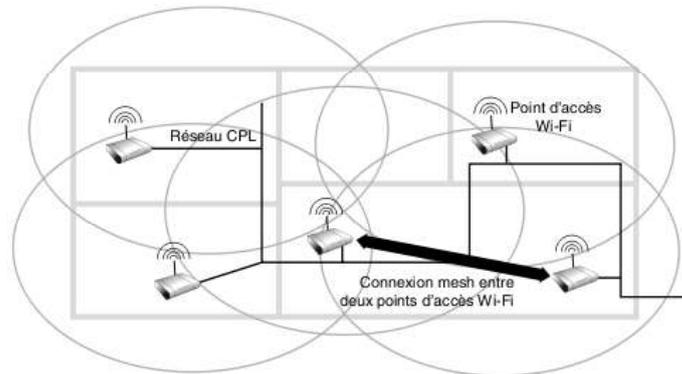


Figure 11.4

*Réseau de domicile de nouvelle génération*

## Les accès

Les débits des accès au domicile ne cessent d'augmenter, depuis les modems ADSL ou VDSL et les InternetBox jusqu'aux accès en fibre optique, de type FTTH (Fiber to the Home). Ces accès utilisent la fibre optique et apportent le gigabit par seconde par utilisateur.

Pour des raisons de coût, l'arrivée de la fibre peut s'arrêter au trottoir avec FTTC (Fiber to the Curb) ou entrer dans le bâtiment avec FTTB (Fiber to the Building). Dans ces deux derniers cas, la continuité s'effectue par le biais de câbles métalliques jusqu'à la porte de l'utilisateur.

Cette révolution de l'accès donne au réseau de domicile la puissance d'un réseau de très grande entreprise d'il y a cinq ans. Elle devrait permettre l'arrivée de nouveaux services à très haut débit, comme les murs de présence, le téléchargement de vidéos ou la diffusion de plusieurs canaux de télévision haute définition.

Même si la fibre optique n'arrive pas jusqu'au domicile, d'autres solutions, comme l'ADSL ou le VDSL, devraient être largement suffisantes pour irriguer le domicile. Ces technologies offrent des débits maximaux de 25 et 100 Mbit/s, tout à fait acceptables pour prendre en charge les applications moyen et haut débit. Les Home Gateways jouent ici un rôle capital. Si elles sont aujourd'hui optimisées pour le Triple ou le Quadruple-Play, elles devraient être dimensionnées pour les applications du domicile dans un avenir proche.

## Les couches supérieures de l'architecture

Les couches supérieures ont pour objectif de réaliser la communication entre les équipements du réseau de domicile entre eux. Les exemples les plus classiques concernent la télévision provenant de la Home Gateway à destination de l'un des écrans de la maison ou bien l'enregistrement d'un programme de télévision vers un DVD pouvant se trouver à l'autre bout du domicile.

Les applications de téléphonie présentent moins de difficulté du fait de leur faible débit. En revanche, elles demandent une gestion particulière de la mobilité en environnement de domicile.

En réalité, c'est la superposition de toutes ces applications, certaines à haut débit et avec des contraintes temps réel, d'autres avec des problèmes de consommation électrique, d'autres encore avec du multipoint et des débits importants, qui rend le réseau de domicile complexe à contrôler.

L'objectif des couches supérieures est de déterminer les profils qui doivent permettre de mettre deux machines en communication, en parlant le même langage et en proposant une qualité de service.

La figure 11.5 illustre certains des objets que l'on peut faire communiquer dans la maison. Ces objets à connecter viennent de trois univers différents :

- Télécommunications : équipements téléphoniques et terminaux multimédias mobiles (PDA, les smartphones, etc.). Ces objets ont une certaine intelligence, et leur système d'exploitation est capable de supporter des algorithmes de contrôle peu sophistiqués.

Leur puissance est très variable, selon l'utilisation autre que téléphonique qui peut être faite de ces terminaux.

- Informatique : ordinateurs portables ou de bureau et plus généralement les équipements qui possèdent un système d'exploitation puissant, de la mémoire et une unité centrale pas trop limitée.
- Électronique grand public : appareils ménagers et électroniques, tels que télévisions, aspirateur, réfrigérateur, etc. Ces équipements disposent d'entrées-sorties analogiques, mais ils sont en train de devenir numériques, permettant leur connexion au réseau de domicile pour y envoyer et en recevoir des paquets IP.

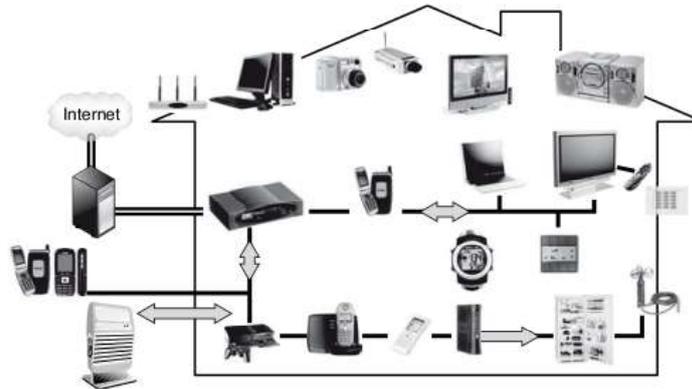


Figure 11.5

*L'univers des objets que l'on peut faire communiquer dans un réseau de domicile*

La révolution dans le domaine des réseaux de domicile a pour objectif de faire communiquer toutes ces machines très différentes venant d'horizons distincts. Pour cela, toutes les machines devront devenir IP. Ainsi les télévisions deviennent-elles des IPTV, les téléphones des téléphones VoIP, et les machines diverses des machines IP. Cette révolution est en cours, même si elle se fait encore peu sentir du fait principalement des coûts de ces équipements IP.

Les industriels du monde de l'informatique ont essayé de développer une technologie de découverte de service aux fonctionnalités minimales, notamment avec le standard UPnP (Universal Plug & Play). Cependant, la découverte de service, si elle est indispensable, n'est pas suffisante pour réaliser la communication. Il est nécessaire de mettre en place une véritable architecture de communication avec le média à utiliser, prenant en compte la vitesse et la qualité de service. Une telle architecture, dite DLNA (Digital Living Network Alliance), effectue un compromis entre l'ensemble des partenaires. Nous l'examinons en détail un peu plus loin dans ce chapitre.

L'architecture DLNA est cependant incomplète, car elle ne prend pas en compte la partie réseau à l'intérieur du domicile. Elle permet essentiellement de mettre d'accord des équipements en vue de communiquer. Pour gérer la qualité de service, la sécurité, la gestion de la mobilité ainsi que la maintenance du réseau de domicile, il faut aller plus loin sur la partie réseau proprement dite. Plusieurs consortiums se proposent d'aller dans ce sens, mais souvent avec des vues partielles. Citons notamment le DSL Forum et surtout HGI (Home Gateway Initiative), que nous détaillons plus loin.

## UPnP

UPnP (Universal Plug and Play) est une technologie qui permet la communication des données entre n'importe quelle machine sous le contrôle d'un équipement du réseau domestique. Des DCP (Device Control Protocol) décrivent des méthodes normalisées pour l'interaction entre machines. Ces protocoles utilisent des techniques standards, comme UDP, TCP, HTTP, SSDP (Simple Service Discovery Protocol) ou SOAP. Les descriptions sont effectuées en XML de façon à être totalement compatibles avec le monde Internet.

L'architecture UPnP spécifie six phases d'interaction, comme illustré à la figure 11.6 :

- L'adressage (Addressing), par laquelle les équipements obtiennent leur adresse IP.
- La découverte (Discovery), par laquelle les points de contrôle découvrent l'existence des équipements.
- La description (Description), par laquelle les points de contrôle apprennent à connaître les équipements et leurs services.
- Le contrôle (Control), par laquelle les points de contrôle invoquent les actions à réaliser.
- La notification (Eventing), par laquelle les équipements peuvent notifier des contrôles.
- La présentation (Presentation), par laquelle les équipements peuvent présenter des pages Web aux points de contrôle pour obtenir les états et lancer des interactions.

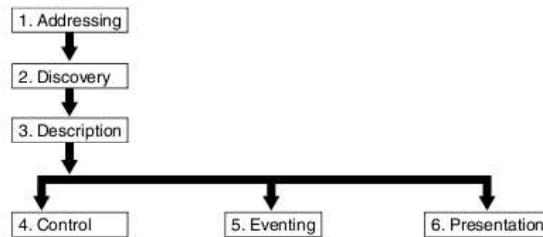


Figure 11.6

*Les six phases d'interaction d'UPnP*

UPnP est un bon début pour l'intercommunication entre des équipements différents, mais il reste insuffisant et peu sécurisé. En particulier, il ne définit pas le média à utiliser pour communiquer, ni le débit, ni la qualité de service nécessaire. C'est la raison de la mise en place de l'initiative DLNA, que nous allons examiner.

## DLNA

L'architecture DLNA provient d'un consortium réunissant tous les grands acteurs des télécommunications, de l'électronique grand public et de l'informatique.

Le consortium comprend environ trois cents membres, dont vingt et un promoteurs (*promoter members*). L'objectif de ce consortium est de fournir les formats de base pour fournir l'interopérabilité des médias. Une de leur tâche importante est de développer des liaisons avec l'ensemble des organismes s'occupant de la normalisation des médias pour uniformiser les présentations et aboutir à un environnement commun, mais sans inventer de nouveaux standards.

DLNA doit également se préoccuper des tests de compatibilité entre les différentes piles protocolaires proposées par les industriels.

L'architecture de DLNA comporte six couches, comme l'illustre la figure 11.7.

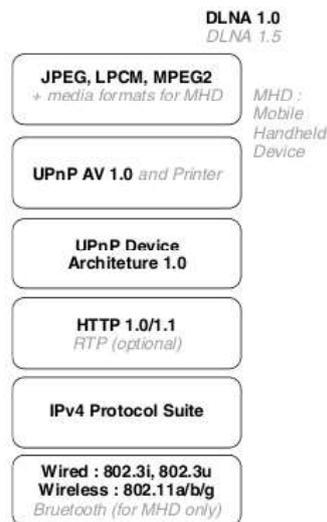


Figure 11.7

Les six couches de l'architecture DLNA

La couche la plus haute détermine les médias qui peuvent être utilisés entre deux équipements. Dans la version DLNA 1.5, les médias acceptables sont JPEG, LPCM et MPEG-2, ainsi que des médias destinés aux équipements d'extrémité mobiles, les MHD (Mobile Handheld Device).

De façon plus précise, les médias et leurs options sont indiqués au tableau 11.4.

Classe	Format de base	Formats optionnels
Image	JPEG	PNG, GIF, TIFF
Audio	LPCM	AAC, AC-3, ATRAC 3plus, MP3, WMA9
AV	MPEG-2	MPEG-1, MPEG-4, AVC, WMV9

TABLEAU 11.4 • Les médias de DLNA

Les couches 5 et 4 reprennent essentiellement UPnP comme technique de découverte des équipements. La couche 3 détermine les protocoles qui peuvent être utilisés entre les équipements d'extrémité. Le principale est HTTP, avec en option RTP.

La couche 2 décrit le protocole de niveau paquet. IPv4 a été choisi comme protocole de base. Le protocole IPv6 pourrait être utilisé en temps voulu.

La couche la plus basse se préoccupe des supports physique et hertzien pour permettre la communication. Les choix tournent autour d'Ethernet avec les Ethernet filaires et la technologie Wi-Fi dans la partie hertzienne. En complément, DLNA supporte MOCA (Multimedia over Coax Alliance) pour les équipements mobiles, la norme Bluetooth a été ajoutée.

L'architecture DLNA est donc beaucoup plus complète que la simple découverte d'équipements. Elle est toutefois encore insuffisante dans les réseaux de domicile pour garantir une communication entre deux équipements avec qualité de service et sécurité.

Après la mise au point de la version 1.5, DLNA s'est donné pour objectif d'étendre cette première génération en y ajoutant les équipements d'impression et les mobiles. Les directives précédentes concernaient deux classes d'équipements, appelées DMS (Digital Media Server) et DMP (Digital Media Player). Avec la nouvelle génération, elles concernent douze classes.

Ces nouvelles possibilités sont les suivantes :

- Introduction de la possibilité d'imprimer sur le réseau vers un DMP (Digital Media Printer), en particulier pour l'impression de photos.
- Possibilité de pousser (*push*) des images, de la vidéo ou du contenu audio d'un serveur vers un équipement de type Player. DLNA n'offre actuellement que la possibilité de tirer (*pull*) le média d'un serveur vers le Player. Cette solution permet de télécharger les images d'un appareil photo numérique vers un PC ou une télévision pour les visionner.
- Possibilité de contrôler la transmission vers un équipement mobile. Par exemple, donner la possibilité à un téléphone portable de transférer une chanson vers un équipement stéréo pour la diffuser.

- Prendre en charge la norme de codage AVC (MPEG-4). C'est le média d'interopérabilité par excellence pour la vidéo. Ce standard est effectivement conçu pour le stockage et le transfert optimisé de contenus vidéo.
- Prise en charge de la technologie Bluetooth.
- Prise en charge du protocole RTP, qui permet d'introduire une meilleure qualité de service applicative (voir le chapitre 16).
- Introduction de la qualité de service pour améliorer le transport des applications de type streaming.
- Prise en charge des téléchargements entre équipements mobiles et équipements audio/vidéo.

#### Modèle de compatibilité

Le consortium DLNA a développé un modèle de compatibilité entre équipements DLNA. Ce modèle est illustré à la figure 11.8. Il définit la compatibilité par le biais de tests de conformité et d'interopérabilité. Des outils de test automatiques ont été développés afin de permettre, entre autres, une certification de la partie UPnP.

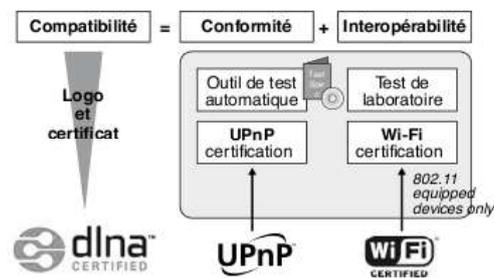


Figure 11.8

Modèle de compatibilité DLNA

Pour pouvoir entrer dans le réseau de domicile facilement, les équipements doivent posséder le sigle DLNA indiqué sur la figure. Malheureusement, les équipements DLNA sont assez nettement plus chers que les autres puisqu'ils incorporent un processeur, de la mémoire, des entrées-sorties, des codeurs, etc.

Comme indiqué précédemment, l'architecture DLNA n'est pas suffisante par elle-même pour garantir la traversée du réseau de domicile. Il faut y ajouter des fonctionnalités internes au réseau de communication lui-même. Les architectures de la section suivante visent à apporter ce complément.

## Les autres architectures

Le DSL Forum, devenu le Broadband Forum en 2008 compte plusieurs centaines de membres, incluant des FAI, des opérateurs, des équipementiers et des industriels du logiciel. Son objectif est de définir une architecture de bout en bout permettant de garantir les communications entre le serveur se trouvant dans un réseau d'opérateur et la machine terminale de l'utilisateur. C'est donc beaucoup plus que le réseau de domicile qui est concerné.

Le Broadband Forum se préoccupe en premier lieu de l'architecture et de la gestion des équipements d'extrémité.

L'architecture définie dans le document TR-069 vise l'autoconfiguration, le provisionnement de service dynamique, la gestion du logiciel et du firmware, le contrôle du statut des équipements et des liaisons ainsi que le monitoring de performance, la gestion des logs, le diagnostic, etc.

Pour cela, le Forum a défini un modèle de données commun pour la gestion des équipements et déterminé des modèles d'objets pour des applications comme la VoIP.

Un autre standard important pour le futur provient du document TR-196, qui concerne le modèle de données pour les points d'accès Femto, ou FAP (Femto Access Point). Les femtocells que nous examinerons en détail au chapitre 20 forment également une composante importante des réseaux de domicile.

Un autre forum très important pour les réseaux de domicile provient du rassemblement d'un certain nombre d'opérateurs de télécommunications au sein du HGI (Home Gateway Initiative), parmi lesquels Orange, BT, DT, Belgacom, Telefonica, Telecom Italia, KPN, TeliaSonera et NTT. Cette initiative essentiellement européenne cherche à définir et normaliser par des spécifications industrielles des passerelles du réseau de domicile.

L'objectif du forum HGI est de spécifier un environnement résidentiel multiservice fondé sur une passerelle située entre la Home Gateway et les équipements résidentiels. La spécification HGI est fondée sur des standards existants. Son objectif est de les compléter afin que la normalisation du réseau de domicile soit complète. En particulier, la spécification est fondée sur les standards du Broadband Forum, DLNA, OSGi, DVB, UPnP, ETSI et UMA.

La passerelle HGI devrait ainsi être au cœur du domicile et jouer le rôle de chef d'orchestre de ce réseau.

## Conclusion

Le réseau de domicile est devenu un vrai réseau, au même titre que celui d'une petite entreprise d'aujourd'hui. Il faut à la fois gérer le réseau du point de vue des couches basses et des applications afin qu'elles puissent être atteintes de toutes les machines du domicile.

Nous n'avons pas détaillé dans ce chapitre les connexions qui devraient provenir des étiquettes électroniques et des réseaux de capteurs ; nous les introduisons au chapitre 24.

Ces connexions devraient se développer énormément dans le domicile pour introduire de nouveaux paramètres, comme la température extérieure sur la porte de sortie ou la possibilité de retrouver ses livres à l'intérieur de la maison. Dans ce dernier exemple, il suffirait de saisir le nom du livre recherché pour qu'une géolocalisation soit possible au travers d'une étiquette électronique associée et une triangularisation pour obtenir l'emplacement géographique.

D'autres développements sont en cours pour étendre le réseau de domicile. La première extension concerne les « extensions » du domicile, comme la voiture ou la maison de campagne. L'utilisateur doit pouvoir bénéficier dans sa voiture des mêmes services que chez lui. De même, les extensions vers la chambre d'hôtel ou le bureau semblent naturelles. Cependant, ces extensions posent de nouveaux problèmes, surtout si la mobilité est un paramètre supplémentaire à prendre en compte. C'est dans cet objectif que des groupes de travail spécifiques, comme VANET (Vehicular Ad hoc Network), ont été mis sur pied par l'IETF. Nous les examinerons au chapitre 23.