

sol, car elles peuvent diriger leurs faisceaux vers un satellite qui se déplace sur une orbite connue. Comme elles peuvent avoir des formes diverses, on les adaptera facilement aux avions ou aux voitures. Dans les cinq prochaines années, même des téléphones portables seront équipés de telles antennes miniatures.

Les concurrents du sol

Dans les pays industrialisés, le principal concurrent des réseaux de satellites sera la fibre optique. En théorie, un satellite transmet les données à un débit inférieur à celui d'un câble de fibres optiques, mais, en pratique, les fibres optiques n'arrivent pas jusqu'au domicile de l'abonné : celui-ci en est séparé par une paire de fils de cuivre ou par un câble coaxial. Ainsi, sur la fin du parcours, les données transitent à des débits inférieurs.

Pour résoudre ce «problème du dernier kilomètre», les ingénieurs ont réussi, en modifiant les installations dans les centraux téléphoniques, à augmenter le débit véhiculé par les câbles coaxiaux et par les paires de fils de quelques dizaines de milliers de bits par seconde à plusieurs millions de bits par seconde. Cette technique, nommée xDSL, est prometteuse, mais elle reste onéreuse, de sorte qu'elle ne satisfera probablement pas tous les besoins pour la transmission des données à hauts débits (les services «large bande»).

Le potentiel des systèmes de transmission de données fondés sur les satellites n'a pas toujours été bien compris. En 1993, Nicholas Negroponte, l'une des personnalités du multimédia, à l'Institut de technologie du Massachusetts, a supposé que la prééminence du satellite ne durerait qu'un temps : après une phase d'engouement pour la transmission par radio, les coûts élevés de ces transmissions et l'encombrement du spectre radio forceraient les sociétés de télécommunications, les services téléphoniques à bande étroite et les services de radiomessagerie à réutiliser les fibres optiques et les câbles coaxiaux.

Je crois que N. Negroponte se trompe. Les sociétés de télécommunications utiliseront à la fois les fibres optiques, les câbles coaxiaux, les réseaux radio terrestres et les satellites pour transmettre la voix, des données multimédias à large bande, des images et des sons. Les fibres optiques, les satel-

lites, ainsi que les réseaux sans fil terrestres auront chacun leur importance dans le système global. Le point technique crucial sera la mise au point de protocoles d'interconnexion entre ces systèmes.

Dans cette hypothèse, les ingénieurs devront élaborer des interfaces entre les réseaux à large bande par des satellites interconnectés et des réseaux de fibres optiques et de câbles coaxiaux. De ce fait, la prochaine génération de satellites de télécommunications devra être 1 000 fois plus rapide que celle des années 1990. La communauté des télécommunications aura alors besoin de protocoles de conversions de données et de standards pour les «systèmes ouverts», des spécifications que les constructeurs utiliseront pour construire de nouveaux équipements compatibles.

Les avancées en matière de satellites crédibilisent mon analyse. Ces cinq dernières années, le nombre de services radio a fortement cru. Aujourd'hui, ils fournissent une communication téléphonique pour moins de 50 centimes par minute. De surcroît, le service de télécommunications dont la croissance est la plus rapide est la télévision par satellite, qui utilise des satellites géostationnaires pour envoyer les signaux à plus de 20 millions d'abonnés dispersés dans le monde entier. Selon les dernières études, ce nombre triplera d'ici à 2005.

L'exploitation d'une ressource limitée

Comment optimiser l'utilisation du spectre radio? Par la compression et le multiplexage. Lors de la numérisation des données, on peut les compresser. Par exemple, les satellites qui diffusent de la télévision numérique utilisent un standard de compression nommé MPEG2. Grâce à cette compression, de la vidéo de haute qualité est transmise sur un canal à seulement six mégabits par seconde. Ainsi le satellite *DirecTV*, dont la bande passante est égale à un gigabit par seconde, transmet 150 canaux de télévision, plus de nombreux canaux de radio numérique. Dans certains réseaux mobiles, on comprime la voix pour les mêmes raisons.

Aux fréquences supérieures, les possibilités de coder le signal augmentent, et on augmente ainsi la bande passante. C'est pourquoi les

fréquences des liaisons radio sont passées de quelques dizaines de mégahertz, au début du siècle, à quelques centaines de gigahertz pour les projets les plus ambitieux. Cependant, le traitement et la transmission d'un grand nombre de données consomment beaucoup d'énergie, ressource rare à bord d'un satellite. Le problème se pose surtout pour les satellites géostationnaires, qui gèrent de nombreux faisceaux et les transmettent sur 36 000 kilomètres.

La gestion de l'énergie est aussi un problème sur les satellites en orbite intermédiaire et en orbite basse, parce que les petites antennes des équipements mobiles ne captent qu'une infime partie du signal émis par le satellite. Afin d'accroître la puissance disponible à bord des satellites, les ingénieurs ont modifié les panneaux solaires, qui délivrent aujourd'hui plus de dix kilowatts (contre deux kilowatts il y a cinq ans). Ces progrès sont dus à une augmentation de la surface des panneaux solaires et à l'emploi de cellules solaires au rendement amélioré : dans les nouvelles cellules, le matériau actif n'est plus le silicium amorphe, mais des combinaisons d'arséniure de gallium et de germanium. Le rendement est de 23 pour cent, soit deux fois celui des cellules au silicium.

D'ici cinq ans, des concentrateurs solaires et des composants multi-jonctions, qui captent l'infrarouge et l'ultraviolet en plus de la lumière visible, amélioreront encore le rendement jusqu'à 30 pour cent. Les panneaux solaires produiront alors plus de 60 kilowatts ; ils seront épaulés par de meilleurs propulseurs à carburant et par des piles à combustible performantes.

Les hauts débits nécessitent de grandes antennes, particulièrement avec les satellites géostationnaires (la puissance nécessaire est proportionnelle au débit). Aujourd'hui, on construit des antennes pour satellite de dix mètres de diamètre, et l'on prévoit des diamètres de 20 à 30 mètres. L'antenne à conjugaison de phase la plus élaborée est destinée au satellite japonais *Gigabits* : pour recevoir les signaux, ce satellite utilisera une antenne d'environ trois mètres de diamètre, constituée de 2 700 antennes indépendantes. Les progrès techniques, en conception comme en fabrication, font envisager des antennes encore plus



ICO Global Communications / Slim Films

2. LES SATELLITES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS du siècle prochain seront équipés de deux antennes à conjugaison de phase (structures hexagonales de l'image ci-dessus). Elles transmettront et recevront les signaux dans des directions bien définies. Leurs panneaux solaires (*les rectangles allongés*) fourniront l'énergie à l'électronique

embarquée, ainsi qu'aux puissants ordinateurs qui commanderont les antennes et manipuleront les milliers de canaux de voix ou de données. Ce satellite de la constellation ico est placé sur une orbite intermédiaire, vers 10 000 kilomètres d'altitude. D'autres satellites seront placés sur des orbites basses.

grandes, composées de plusieurs dizaines de milliers d'éléments.

Afin d'être accessibles à un public plus large, les récepteurs devront être moins coûteux qu'aujourd'hui. Une meilleure conception, ainsi que l'adoption de techniques de production en série réduiraient les coûts de fabrication. Certains récepteurs de télévision numérique ont une antenne de seulement 30 centimètres de diamètre, et coûtent moins de 1 500 francs. Dans le futur, des antennes à conjugaison de phase en arséniure de gallium seront moins onéreuses.

Orbite haute ou basse?

La plupart des satellites de télécommunications sont aujourd'hui géostationnaires. Depuis la création d'*Intelsat* (pour *International Telecommunications Satellites organization*, «Organisation internationale pour les satellites de télécommunications»), en 1965, la majorité d'entre eux communique avec des stations fixes au sol. L'organisme *Inmarsat* (pour *International Maritime Satellites organization*, «Organisation internationale pour les satellites maritimes») a lancé, il y a dix ans, la téléphonie avec les mobiles, ainsi que des liaisons numériques pour les navires. En 1997, des sociétés (*American Mobile Satellite Corporation* et *Telesat Mobile*) ont introduit des services similaires pour les mobiles terrestres

d'Amérique du Nord. Ces sociétés ont réduit les coûts de leurs équipements et de leurs services en proposant des antennes plus grandes, mais leurs services ne fonctionnent pas très bien en raison d'une panne et d'une faible pénétration du marché.

Devant la difficulté de mise en œuvre de la téléphonie personnelle en utilisant uniquement des satellites géostationnaires, les constructeurs ont étudié les réseaux de satellites placés en orbite basse (altitude inférieure à 2 000 kilomètres) ou intermédiaire (entre 10 000 et 16 000 kilomètres d'altitude).

D'ici un an ou deux, trois réseaux mondiaux de communication seront reliés aux mobiles terrestres : *Iridium*, *ICO* et *Globalstar*. Ils proposeront des services de téléphonie et de radiomessagerie globaux ; *Iridium* sera le premier en service.

Les services à large bande, tels ceux qui offriront des applications multimédias interactives, ne seront accessibles par des systèmes de bureau que si les réseaux de satellites émettent à des fréquences supérieures à 20 gigahertz. Les antennes à conjugaison de phase autoriseront un important facteur de réutilisation des fréquences, mais même ainsi, ces systèmes utiliseront une grande partie du spectre. Une dizaine de réseaux pour la transmission des données sont projetés, dont *Teledesic* ou *Celestri* (voir *Les réseaux de satellites*, page 48).

3. LES SATELLITES placés en orbite géostationnaire, à 36 000 kilomètres au-dessus du sol, relieront des usagers mobiles séparés de plusieurs milliers de kilomètres, mais les délais dus à la durée du trajet aller et retour seront de l'ordre du quart de seconde.

Techniques de demain

Le coût très élevé des constellations de satellites explique l'intérêt croissant pour les plates-formes de haute altitude, avions ou ballons. Le coût de lancement de ces engins est modeste, et ils peuvent redescendre pour leur entretien. Ces plates-formes peuvent embarquer des antennes à conjugaison de phase de 3 500 faisceaux, qui assurent non seulement les communications montantes et descendantes avec les mobiles, mais émettent aussi des signaux de télévision sur 2 500 kilomètres carrés. Ces systèmes réutiliseront 100 fois les fréquences et seront reliés aux satellites pour effectuer des connexions mondiales.

Quatre types de plates-formes sont envisageables : les ballons gonflés à l'hé-

4. DES SATELLITES EN ORBITE BASSE, à quelques centaines de kilomètres d'altitude, établiront des liaisons rapides entre des usagers séparés par des distances analogues. Pour couvrir toute la Terre, un grand nombre de tels satellites est nécessaire.

5. DANS LES ANNÉES À VENIR, des plates-formes évoluant à plus de 20 000 mètres d'altitude relieront des usagers distants de 500 kilomètres. Certaines seront des dirigeables, d'autres seront munies d'ailes et voleront comme des avions.