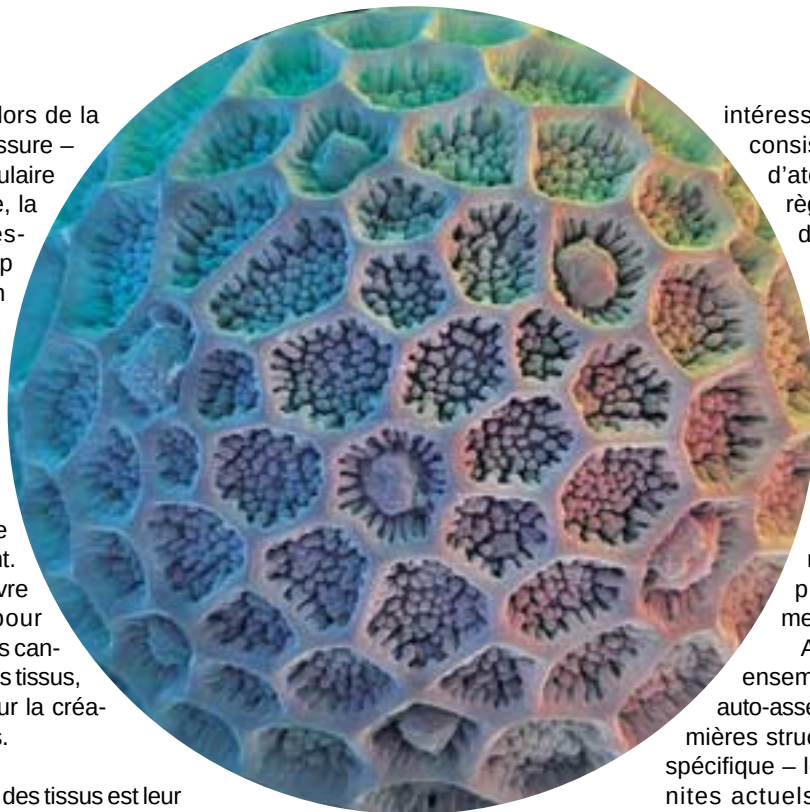


le substrat – comme lors de la cicatrisation d'une blessure – et qu'une division cellulaire s'impose. Au contraire, la forme arrondie correspond à la situation où trop de cellules sont en concurrence sur la matrice ; certaines doivent mourir pour empêcher une prolifération incontrôlée et la formation d'une tumeur. Entre ces deux extrêmes, le tissu se comporte normalement. Cette commutation ouvre de nouvelles voies pour induire le traitement des cancers ou la réparation des tissus, et peut-être même pour la création de tissus artificiels.



4. Un grain de pollen a une forme de dôme géodésique.

Une propriété capitale des tissus est leur comportement mécanique. Un très grand nombre de tissus distincts, tels que les muscles, le cartilage, les vaisseaux sanguins et la peau, réagissent selon une loi de raidissement linéaire. Quand vous tirez sur votre peau, vous sentez la résistance s'accroître à mesure que vous tirez plus fort. Des travaux récents montrent que même des molécules isolées comme l'ADN manifestent ce raidissement linéaire ; avant le modèle de tenségrité, il n'existait pas d'explication mécanique de ce comportement.

En utilisant un modèle de tenségrité à base de bâtonnets et d'élastiques, nous avons montré que les cellules réagissent comme des structures de tenségrité. Tous les éléments structuraux interconnectés modifient d'eux-mêmes leur disposition en réaction à une contrainte. Le raidissement linéaire s'explique alors : lorsque la force appliquée augmente, de plus en plus d'éléments se disposent dans la direction où s'exerce la contrainte.

Comme une force, même localisée, modifie la forme globale d'une structure de tenségrité, la liaison d'une molécule à une protéine impose un réarrangement complet des différentes régions sur toute la longueur de la protéine. Par exemple, lorsqu'une molécule portant un signal se lie à un récepteur qui traverse la membrane cellulaire, cette liaison peut modifier la conformation à l'extrémité opposée du récepteur. Ces changements déforment à leur tour des protéines adjacentes et déclenchent une série de restructurations moléculaires à l'intérieur de cette

cellule. C'est ainsi que les cellules détectent les informations qui leur parviennent et y réagissent.

Des molécules aux os, aux muscles ou aux tendons, la tenségrité est le système de construction privilégié de la nature. La tenségrité explique, par exemple, comment, chaque fois que vous bougez un bras, votre peau s'étire, comment votre matrice extracellulaire s'étend, comment vos cellules se déforment et comment les molécules interconnectées qui forment l'armature interne des cellules ressentent cette sollicitation.

Peut-être les structures de tenségrité entièrement triangulées ont-elles été sélectionnées au cours de l'Évolution en raison de leur efficacité structurelle qui associe haute résistance mécanique et économie de matériaux. La flexibilité des structures de tenségrité précontraintes est sans doute avantageuse parce qu'elle leur permet de prendre diverses formes. Par exemple, si une molécule ou une cellule est apte à se transformer, à une température ou à une pression données, en une forme plus stable ou plus efficace sur le plan métabolique, sa durée de vie en est prolongée. Elle interagit mieux avec d'autres entités similaires pour donner de nouveaux auto-assemblages.

Les chercheurs sont maintenant convaincus que l'évolution biologique a commencé dans des couches d'argile plutôt que dans la mer primordiale. Il est

intéressant de noter que l'argile consiste en un réseau poreux d'atomes disposés selon les règles géodésiques au sein de formes octaédriques et tétraédriques. Comme ces octaèdres et ces tétraèdres ne sont pas fortement compactés, ils peuvent bouger et glisser les uns par rapport aux autres. Cette souplesse permet à l'argile de catalyser un grand nombre de réactions chimiques, dont celles qui ont produit les premiers éléments de la vie organique.

Avec le temps, différents ensembles moléculaires se sont auto-assemblés pour former les premières structures ayant une fonction spécifique – les précurseurs des organites actuels –, qui se combinèrent pour créer les premières cellules. Ces cellules produisirent des protéines qui s'auto-assemblèrent pour constituer les supports d'ancrage des matrices extracellulaires, qui, à leur tour, se sont auto-assemblées en tissus pluricellulaires. Des organes se développèrent par auto-assemblage de tissus, et des organismes complexes firent leur apparition par combinaison et remodelage progressif d'organes différents. Le développement d'un embryon à partir d'un spermatozoïde et d'un ovule récapitule ces étapes d'auto-organisation.

L'apparition de l'ADN et des gènes donna naissance à un nouveau mécanisme pour engendrer une diversité structurelle qui accéléra l'Évolution. Pendant tout ce temps, les règles définissant le processus d'auto-assemblage hiérarchique restèrent pratiquement inchangées. Il n'est donc pas surprenant que la disposition générale des os et des muscles soit extraordinairement voisine chez *Tyrannosaurus rex* et chez *Homo sapiens*, et que les formes géodésiques telles qu'hexagones, pentagones et spirales soient omniprésentes dans les systèmes naturels.

Comme le suggérait, au début du siècle, le zoologiste écossais D'Arcy Thompson, en se référant à Galilée qui, lui-même, citait Platon : le Grand Livre de la Nature est écrit dans le langage de la géométrie.

Donald E. INGBER est professeur de physiologie à l'Université Harvard (États-Unis).

La voie des ondes



Les réseaux de satellites

John Evans

Les télécommunications du XXI^e siècle

Joseph Pelton



Les réseaux radio terrestres

Alex Hills

Les applications des réseaux cellulaires

Warren Stutzman
et Carl Dietrich



L'occupation du spectre radio

David Hughes
et Dewayne Hendricks

Guglielmo Marconi, qui inventa la télégraphie sans fil en 1896, ne reconnaîtrait pas les systèmes de télécommunications. Depuis le début de la révolution micro-électronique, il y a 40 ans, les circuits se sont tant miniaturisés que l'on glisse aujourd'hui un téléviseur ou une radio dans une poche et que l'on a encore de la place pour un téléphone mobile.

Le Globe est en permanence inondé d'ondes électromagnétiques qui transmettent la voix et les images, mais des évolutions encore plus radicales sont en gesta-

tion. Ce dossier montre comment la nouvelle génération de satellites de télécommunications formera un réseau mondial qui offrira, via des terminaux portables situés n'importe où, des services liés à la parole et aux transferts de données à haut débit. Associés aux ordinateurs portables et aux réseaux terrestres, ce réseau de satellites mettra à portée de souris l'intégralité du savoir numérique de notre civilisation. Ces réseaux, qui amélioreront notre sécurité, nous rapprocheront et nous aideront à mieux communiquer.



Les réseaux de satellites

JOHN EVANS

Grâce aux flottilles de satellites de télécommunications, les possesseurs d'un téléphone portable auront accès au réseau téléphonique, à partir de n'importe quel point du Globe.

Le satellite est aujourd'hui la pierre angulaire de notre système de télécommunications. Les débuts furent pourtant modestes : en 1965, le premier satellite de télécommunications placé sur orbite ne comportait que 240 canaux vocaux. Après 35 ans de perfectionnements, les satellites transmettent un tiers du trafic vocal mondial et la plupart des signaux de télévision qui transitent entre les pays.

Le trafic vocal assuré par les satellites est surtout à destination de pays qui n'ont pas de réseau de fibres optiques, le moyen privilégié de transmission des communications téléphoniques : un gros câble à fibre optique transporte dix gigabits par seconde, alors qu'une liaison satellite transporte moins de un gigabit par seconde. Les satellites les plus importants sont sur l'orbite géostationnaire, à 36 000 kilomètres au-dessus du même point du Globe en permanence. À cette distance, un signal électromagnétique met environ un quart de seconde pour atteindre le satellite et revenir, ce qui ralentit la conversation. Bien que la plupart des utilisateurs du téléphone se satisfont de ce délai, les satellites de télécommunications sont de plus en plus utilisés pour transporter des signaux de télévision plutôt que la voix.

Les réseaux de satellites, dont le premier devrait être opérationnel dès la fin de l'année 1998, pourraient inverser cette tendance. Ces nouveaux réseaux fourniront des services de téléphonie mobile par satellites. Ils seront constitués de nombreux satellites placés bien au-dessous de l'orbite géostationnaire, ce qui réduira les délais de transmission. Ces réseaux seront complétés par un ensemble de satellites qui transmettront exclusivement des données, telles celles du réseau Internet. Au cours des sept prochaines années, trois à cinq réseaux de satellites seront dédiés à la voix, tandis qu'une dizaine de réseaux de satellites transporteront des données.

La prévision de l'évolution d'un marché qui n'existe pas encore est impossible. Néanmoins, plusieurs groupes industriels ont investi des milliards de francs dans de nombreux projets, certains déjà bien avancés. Les difficultés et les risques sont

importants : certains projets tablent sur la mise au point d'une nouvelle génération de satellites puissants, capables non seulement d'amplifier et de retransmettre les signaux, mais aussi de les diriger vers des récepteurs spécifiques. De surcroît, ces systèmes fonctionneront à de très hautes fréquences, dans des bandes radio encore inutilisées par des satellites de télécommunications.

Téléphonie numérique

Les nouveaux réseaux satellitaires combineront des caractéristiques des réseaux téléphoniques mobiles terrestres avec celles, plus classiques, des réseaux de télécommunications utilisant des satellites. Aujourd'hui, les téléphones mobiles emploient des ondes radio dont la fréquence est comprise entre 800 et 900 millions de hertz (mégahertz), ce qui correspond à une longueur d'onde de quelques

1. LES SATELLITES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS du réseau Iridium (représentés ici) ou d'autres réseaux en construction achemineront les communications téléphoniques. Sur cette page, on voit deux des 66 satellites qui seront en place à la fin de 1998. Ces satellites sont sur des orbites terrestres basses ; en réalité, ils sont plus éloignés les uns des autres que cette vision d'artiste ne le suggère. Les panneaux rectangulaires situés à l'extrémité inférieure de l'engin de 4,6 mètres de long sont des panneaux solaires ; les trois autres, articulés, sont les antennes principales.



dizaines de centimètres, voisine de la taille des antennes. Les nouveaux réseaux pour les communications personnelles utiliseront une fréquence deux fois supérieure, mais leur fonctionnement restera identique.

Dans les réseaux radiomobiles classiques, la zone couverte est divisée en «cellules», chacune équipée d'une station de base associée à une tour hertzienne terrestre. Pour éviter les brouillages, les téléphones mobiles émettent à une fréquence vers la station et reçoivent à une fréquence différente. La station de base transforme généralement ces signaux radio en micro-ondes (des ondes de fréquence supérieure à celle des ondes radio), qui sont transmises à un commutateur cellulaire, où une seconde transformation restitue des signaux de parole. Cette transformation se fait parfois dans la station de base elle-même, et la parole est alors véhiculée par des lignes téléphoniques classiques avant d'être transmise au commutateur cellulaire.

Ce dernier a deux fonctions : il établit les communications et les transfère à un autre commutateur lorsque l'abonné change de cellule durant la communication. Chaque commutateur cellulaire est aussi relié à un commu-

tateur central du réseau téléphonique public, afin de permettre aux abonnés du téléphone cellulaire de communiquer avec les utilisateurs de téléphones fixes.

Les abonnés aux services cellulaires sont devenus si nombreux que les systèmes numériques se sont imposés. Dans les réseaux classiques, analogiques, la voix est codée par des variations de la fréquence, une technique nommée modulation de fréquence. Ce procédé est coûteux en bande passante : le signal transmis utilise entièrement une bande, ou canal, de 30 kilohertz de large. Afin de réduire l'encombrement de l'espace radio, de nombreuses compagnies utilisent des matériels qui communiquent des messages codés en binaire (les signaux sont composés de séries de 0 et de 1). Les données ainsi numérisées sont alors comprimées

avant la transmission, ce qui réduit la durée d'occupation du canal par chacune des communications, au prix d'une légère baisse de la qualité.

Dans les réseaux téléphoniques classiques, les réseaux commutés, la parole est également transmise sous forme numérique, mais à des débits environ huit fois supérieurs à ceux des réseaux cellulaires (64 kilobits par seconde pour les réseaux commutés). Avec des codages numériques à des débits aussi élevés, la qualité est meilleure, mais la transmission nécessite encore plus de bande passante que si l'on transmettait le signal non numérisé. Pourquoi, alors, utiliser un codage numérique ? D'une part, parce qu'il permet le mélange de plusieurs communications dans une seule fibre optique ou dans une seule ligne micro-onde : les flots de données individuels peuvent être combinés en un seul flot de débit supérieur (multiplexage) qui, à son tour, peut être mélangé avec d'autres dans un flot de débit encore supérieur. D'autre part, la technique numérique est moins sensible aux altérations des signaux dans le réseau : tous les bits ayant la même amplitude, on peut facilement restaurer l'amplitude d'un bit qui aurait été affaibli au cours de la transmission.

LEO ORBITE BASSE (ALTITUDE INFÉRIEURE À 2 000 KILOMÈTRES)
MEO ORBITE INTERMÉDIAIRE (ALTITUDE D'ENVIRON 10 000 KILOMÈTRES)
GEO ORBITE GÉOSTATIONNAIRE (36 000 KILOMÈTRES D'ALTITUDE)

CONSTELLATIONS POUR LE TRANSPORT DE LA PAROLE					
	IRIDIUM	GLOBALSTAR	ICO	ELLIPSO	ECCO
SOCIÉTÉ	Motorola	Loral/Qualcomm	ICO Global Communications	Mobile Communications Holdings	Constellation Communications
NOMBRE DE SATELLITES	66	48	10	14	46
PLANS DES ORBITES	6 circulaires polaires (86,5 degrés)	8 circulaires inclinées (52 degrés)	2 circulaires inclinées (45 degrés)	2 elliptiques inclinées (116,6 degrés) 1 elliptique équatoriale (0 degré)	7 circulaires inclinées (62 degrés) 1 circulaire équatoriale (0 degré)
ALTITUDE DE L'ORBITE (EN KILOMÈTRES)	780 (LEO)	1 414 (LEO)	10 355 (MEO)	520 - 7 846 (MEO) 4 223 - 7 846 (MEO)	2 000 (LEO)
NOMBRE DE SATELLITES PAR PLAN ORBITAL	11	6	5	4 par elliptique 6 par équatoriale	5 par inclinée 11 par équatoriale
NOMBRE DE FAISCEAUX PAR SATELLITE	48	16	163	61	32 par inclinée 24 par équatoriale
COÛT ESTIMÉ (EN MILLIARDS DE FRANCS)	20	15	27	5,5	17

CONSTELLATIONS POUR LE TRANSPORT DE DONNÉES							
	ASTROLINK	CELESTRI	CYBERSTAR	SPACEWAY	GE*STAR	MORNINGSTAR	TELEDESIC
SOCIÉTÉ	Lockheed Martin	Motorola	Loral	Hughes	G.E. Americom	Morning Star	Teledesic
NOMBRE DE SATELLITES	9	63 LEO/9 GEO	3	20 MEO/16 GEO	9	4	288
PLANS DES ORBITES	Équatoriale (0 degré)	7 inclinées (48 degrés) 1 équatoriale (0 degré)	Équatoriale (0 degré)	4 inclinées (55 degrés) 1 équatoriale (0 degré)	Équatoriale (0 degré)	Équatoriale (0 degré)	12 inclinées (98 degrés)
ALTITUDE DE L'ORBITE (EN KILOMÈTRES)	GEO	1 400 (LEO) et GEO	GEO	10 352 (MEO) et GEO	GEO	GEO	1 375 (LEO)
DÉBIT ESTIMÉ (EN GIGABITS PAR SECONDE)	6,0	1,5	9,0	4,4	4,7	0,5	10,0
CAPITAL NÉCESSAIRE (EN MILLIARDS DE FRANCS)	24	77	10	38	24	5	54

Les commutateurs locaux sont reliés par des câbles optiques à des commutateurs plus importants, des routeurs, qui gèrent les appels à longues distances. Les appels internationaux, notamment, sont dirigés vers des centres spéciaux qui les acheminent par des câbles sous-marins ou par des satellites.

Tous les pays du monde ne sont pas reliés par des fibres optiques, mais la plupart sont reliés aux satellites de l'Organisation internationale des télécommunications (*Intelsat*). Cette organisation gère les satellites internationaux qui fonctionnent dans la bande de radiofréquences réservée aux «satellites fixes». Les appels via satellites sont dirigés vers la station terrestre *Intelsat* la plus proche. La séquence de bits codant ces appels module une onde radio qui est amplifiée et transmise au satellite par une antenne parabolique dont le diamètre atteint 15 mètres.

Arrivée au satellite, cette onde est très faible, car l'énergie du signal décroît proportionnellement au carré de la distance parcourue. Ainsi, l'antenne de réception des satellites géostationnaires doit être relativement grande, environ deux à trois mètres de diamètre. Le signal recueilli est amplifié et retransmis à une station réceptrice, sur la Terre, où les signaux individuels de parole sont reconstitués.

Les satellites d'*Intelsat* transmettent simultanément plusieurs dizaines de milliers de conversations. À bord, l'énergie fournie par des panneaux solaires et par de petits réacteurs utilisant un carburant embarqué (comme l'hydrazine) maintient les antennes en direction de la Terre, en rectifiant la position du satellite.

Les satellites, stations de base

Les nouveaux satellites de télécommunications auront les avantages des réseaux mobiles et ceux des satellites classiques. Ce seront des stations de base en orbite, avec lesquelles les téléphones mobiles communiqueront directement. Comme les satellites classiques, ils couvriront de très grandes zones, même des régions qui ne possèdent pas encore de réseaux cellulaires terrestres.

Ces avantages ne seront accessibles qu'au prix d'avancées techniques. Un obstacle fondamental provient de l'impossibilité à équiper les téléphones mobiles d'autre chose que de petites antennes non directives. De surcroît, en utilisation normale, la puissance d'émission doit être inférieure à un watt : à des puissances aussi faibles, les utilisateurs ne devraient plus craindre les effets biologiques des

ondes radio, et les batteries devraient durer plus longtemps.

Le signal émis par les téléphones étant de faible puissance, sa réception par un satellite en orbite géostationnaire nécessiterait une antenne de dix à douze mètres de diamètre. Comme le déploiement en orbite de telles antennes reste difficile, les satellites de ces réseaux seront sur des orbites beaucoup plus proches de la Terre. En rapprochant ainsi les orbites de 36 000 kilomètres d'altitude à 10 000 kilomètres, on multiplie par 13 la puissance du signal reçu du téléphone mobile, de sorte que des antennes de deux à trois mètres, analogues à celles des satellites géostationnaires, suffisent.

La contrepartie de l'utilisation d'orbites basses est une diminution de la couverture. Sur une orbite géostationnaire, un satellite «voit» environ un quart de la surface terrestre, et trois ou quatre satellites suffisent à couvrir le Globe. À 10 000 kilomètres d'altitude, un satellite voit moins de surface, et sa période de rotation est d'environ six heures : pour couvrir le Globe, on devra utiliser une flottille d'une dizaine de satellites, à égale distance les uns des autres, d'où le nom de constellation de satellites.

Le signal émis par un téléphone portable étant faible, la tâche de gestion de la connexion est réalisée par

le satellite. L'installation ne fonctionnera que si le satellite utilise des faisceaux extrêmement étroits, d'environ un degré d'angle, couvrant chacun une cellule au sol d'environ 150 kilomètres de diamètre. De nombreux faisceaux couvriront la surface voulue.

On place généralement les satellites au-dessus ou au-dessous de la ceinture de Van Allen, où les particules de haute énergie endommageraient les panneaux solaires et l'électronique embarquée. C'est pourquoi les satellites évolueront à des altitudes supérieures à 10 000 kilomètres ou inférieures à 1 500 kilomètres. Pour cette dernière orbite, la période est de 100 minutes environ, et la couverture du Globe nécessite alors plus d'une centaine de satellites. Ces deux types d'orbites sont respectivement nommés «orbite circulaire intermédiaire» et «orbite terrestre basse».

Choix de satellites

L'un des avantages des constellations de satellites est l'existence d'un chemin dégagé entre le satellite et tous les abonnés, ce qui autorise l'utilisation de faibles puissances (les systèmes terrestres cellulaires pâtiennent du manque de visibilité des tours émettrices, d'où la nécessité d'utiliser une puissance d'émission élevée). Toutefois, les communications entre un satellite et un abonné mobile pourront être perturbées par des bâtiments, des arbres ou d'autres obstacles. Les satellites situés sur des orbites circulaires intermédiaires, qui sont plus haut dans le ciel et qui le traversent plus lentement que les satellites sur des orbites basses, devraient assurer de meilleures transmissions.

Sur des orbites élevées, le Globe est couvert avec moins de satellites, mais les antennes doivent être plus grandes. De plus, comme les faisceaux possèdent la même ouverture, chaque antenne doit former un nombre de faisceaux supérieur pour conserver la même couverture au sol. Les satellites destinés aux orbites basses sont généralement plus petits, plus légers et plus économiques que ceux desti-

nés aux orbites intermédiaires, eux-mêmes moins chers que les satellites géostationnaires.

Les opérateurs de ces constellations de satellites devront également apprendre à gérer les changements de zone de couverture. La situation est inverse de celle du réseau cellulaire terrestre : l'abonné est stationnaire, mais la cellule se déplace. Le changement de faisceau d'un même satellite est relativement aisé. En revanche, la situation est plus complexe lorsqu'il faut transférer la communication entre satellites, ce qui arrivera vraisemblablement avec une constellation sur orbite basse. La difficulté dépendra de la configuration précise de l'ensemble des satellites ; dans le meilleur des cas, le transfert ne devra se produire que lorsque le signal de l'abonné sera reçu par l'autre satellite.

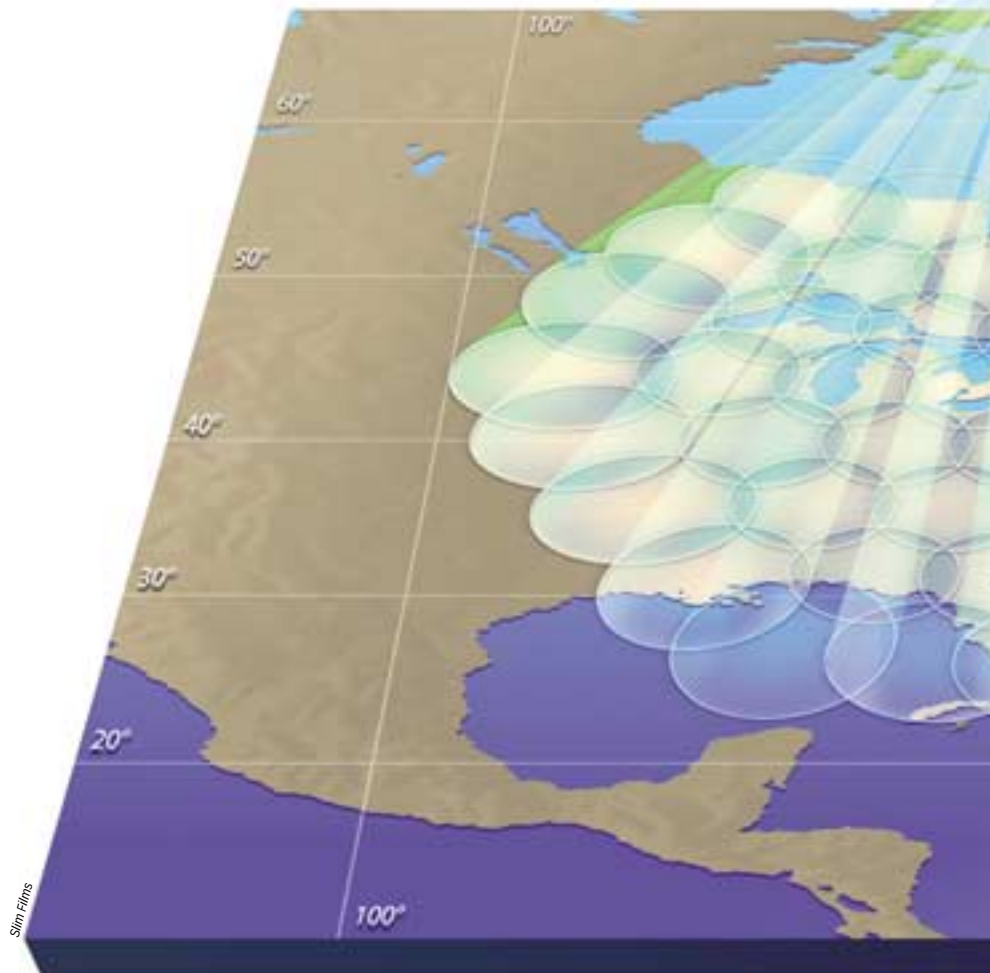
Tous les systèmes décrits ici requièrent une certaine supervision. L'établissement d'une connexion nécessite généralement une demande, effectuée par le téléphone portable, qui utilise alors un canal de signalisation. Tous les réseaux, même terrestres, nécessi-

tent que l'appel soit transmis dans un canal différent du canal de signalisation : le canal de signalisation est alors libéré, de sorte que d'autres communications peuvent ensuite s'établir. Les signaux reçus par un satellite doivent être retransmis à une «passerelle terrestre», qui suit en permanence le satellite dans sa traversée du ciel. Là, le signal est retransformé en signal téléphonique ordinaire, puis introduit dans le réseau public.

Téléphone et voyage d'affaires

Les divers réseaux cellulaires par satellites différeront selon leurs clients. Les utilisateurs potentiels les plus nombreux sont des hommes d'affaires de deux types : ceux des pays industrialisés, qui commercent souvent avec des pays en développement où le réseau téléphonique est insuffisant, et ceux qui utilisent leur téléphone portable dans des zones où les réseaux cellulaires terrestres ne fonctionnent pas. D'autres marchés existent : les compagnies téléphoniques visent les personnes qui vivent en milieu

2. CHACUN DES 40 FAISCEAUX D'UN SATELLITE IRIDIUM couvre, sur la Terre, une surface de 600 kilomètres de diamètre. Cette division en faisceaux étroits est imposée par la faible puissance émise par les téléphones mobiles. Les commutations et les routages nécessaires à la connexion sont gérés par le satellite.



rural, sans connexion au réseau téléphonique, ou divers services publics (police, pompiers, etc.) qui ont besoin d'un réseau de communication qui résisterait à des catastrophes, tels les séismes ou les inondations.

Sur les différents réseaux proposés, cinq aboutiront probablement. Quatre ont été agréés par la Commission américaine des télécommunications (FCC) ; le cinquième est issu de l'organisation internationale *Inmarsat*, semblable à *Intelsat*, mais spécialisée dans la téléphonie cellulaire. Les quatre projets américains sont *Iridium*, construit par plusieurs sociétés, dont *Motorola* et *Lockheed Martin* ; le réseau *Globalstar*, construit par un fabricant de satellites (*Loral Space and Communications*) et un fabricant d'équipements cellulaires (*Qualcomm*), avec une participation européenne (*Alcatel Espace*, *Aérospatiale*, *Alenia Spazio*) ; ECCO, proposé par la Société *Constellation Communication* ; enfin, *Ellipso*, qui sera construit par la Société *Mobile Communication Holdings*.

D'un coût de près de 20 milliards de francs, *Iridium* est le

projet le plus ambitieux, mais aussi le plus près d'aboutir. Au total, la constellation *Iridium* sera constituée de 66 satellites, chacun capable de transmettre 1 100 communications simultanées et possédant suffisamment de carburant pour durer huit ans (le projet prévoyait initialement 77 satellites, d'où le nom *Iridium*, un élément chimique qui possède 77 électrons ; pour des raisons budgétaires, ce nombre a été ramené à 66). La Société *Motorola* a déjà lancé deux tiers des satellites et prévoit la mise en service du réseau au dernier trimestre 1998. Ces satellites sont sur des orbites polaires basses circulaires, à 780 kilomètres d'altitude. Six plans orbitaux comprendront chacun 11 satellites équidistants.

Ces satellites transmettront la parole, les données à 2,4 kilobits par seconde et incluront un service de radiomessagerie. Les connexions devraient être de meilleure qualité que dans les réseaux concurrents, car les concepteurs ont prévu que les téléphones seront utilisables à partir d'un véhicule (un taxi, par exemple). Cette qualité est imposée par la cible commerciale visée : les voyageurs d'affaires.

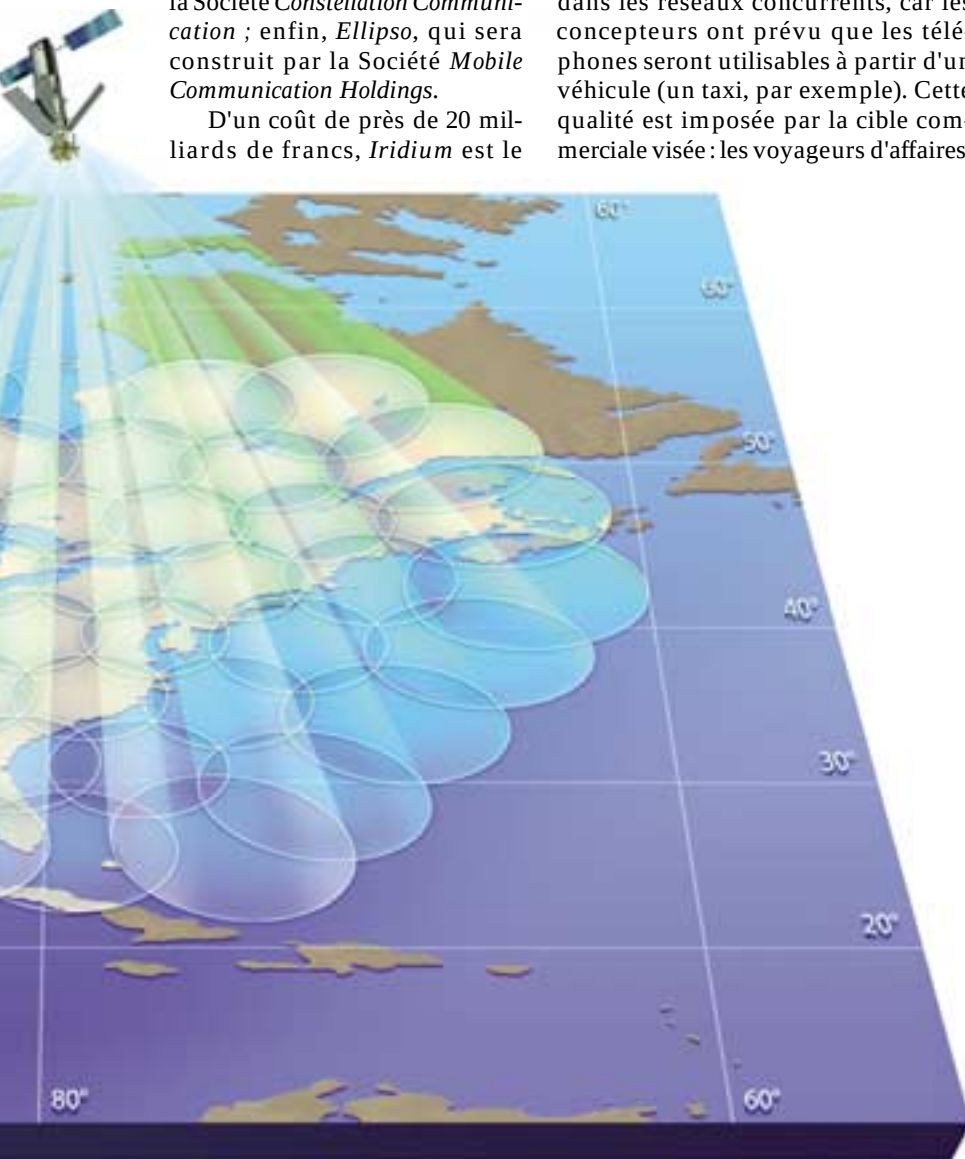
La complexité du système *Iridium* provient principalement de ce que les satellites communiqueront non seulement avec les stations terrestres, mais aussi les uns avec les autres. Pour acheminer le trafic, chaque satellite emporte un ensemble de tables de routage, grâce auxquelles de nouvelles instructions d'acheminement sont décidées toutes les minutes environ. Les signaux provenant du sol seront transmis par paquets (de courtes séquences de bits), dont chacun contient l'adresse du destinataire (comme dans le réseau Internet). Le satellite décode cette adresse et transmet les paquets à la destination indiquée.

Des liaisons entre satellites

Cette destination peut être un autre téléphone portable d'un abonné à *Iridium* ou bien une passerelle terrestre. Si ni l'un ni l'autre n'est accessible, le satellite s'adresse à l'un des quatre satellites voisins, celui placé avant ou après dans le même plan orbital, ou le plus proche à l'Est ou à l'Ouest dans les plans adjacents. Ces liens transversaux compliquent l'ensemble du système, mais réduisent le nombre de passerelles terrestres à une douzaine, tout en fournissant une couverture mondiale.

Le fonctionnement est essentiellement assuré par les satellites. Afin de prévenir les saturations, les ingénieurs ont conçu les liens de manière que chacun ait la capacité de transmettre tous les messages émis par un satellite. Des instructions complémentaires de routage stipulent le fonctionnement à adopter si l'un des liens transversaux tombait en panne.

La constellation *Globalstar* se fonde également sur des satellites en orbite basse, mais les satellites ne communiqueront pas directement. Ce choix simplifie considérablement la conception du système, mais les abonnés n'obtiendront de communication que s'ils sont en vue d'un satellite de la constellation et si ce satellite est aussi en vue d'une passerelle terrestre. De ce fait, les zones couvertes se trouvent toutes à moins de 1 600 kilomètres d'une passerelle terrestre. Pour que le service soit vraiment global, il faudrait plus de 200 stations terrestres, ce qui semble irréaliste. Pour cette raison, *Globalstar* sera destiné aux voyageurs d'affaires qui restent dans un pays plutôt qu'à ceux qui voyagent à l'étranger.



Depuis février 1998, huit satellites de *Globalstar* ont été lancés, et les responsables du réseau espèrent une ouverture au public au début de 1999. Ils ont déjà attribué 100 concessions à des partenaires qui géreront le réseau dans les différents pays. En plus de la voix, *Globalstar* transmet des télécopies et des données.

La constellation *Globalstar* comportera 48 satellites répartis sur huit orbites. Les orbites seront circulaires, à 1 414 kilomètres d'altitude, et inclinées de 52 degrés par rapport à l'équateur. L'utilisation d'orbites inclinées concentre les satellites aux basses latitudes, où vit la majorité de la population, mais les latitudes supérieures à 70 degrés seront mal desservies.

Le système ECCO aura également ses satellites en orbites basses. Il est prévu pour fonctionner avec 46 satellites, 11 sur des orbites circulaires équatoriales situées à 2 000 kilomètres d'altitude, et cinq sur chacune des sept autres orbites inclinées. Ce système assurera des liaisons téléphoniques et des télécopies à 2,4 kilobits par seconde, dans les zones rurales. Les satel-

lites de cette constellation seraient construits par la Société franco-britannique *Matra Marconi Space*.

Orbites intermédiaires

Les deux réseaux de communications personnelles fondés sur des satellites situés sur des orbites intermédiaires sont ICO, proposé par la Société *ICO Global Communication*, et *Ellipso*. Le système *Ellipso* est particulier, parce que les orbites seront elliptiques, de sorte que les satellites desserviront mieux l'hémisphère Nord, où vit la majeure partie de la population mondiale : les orbites sont en effet choisies de manière que leurs points le plus éloignés de la Terre (apogée) soient au-dessus de l'hémisphère Nord. Ainsi, les satellites resteront plus longtemps au Nord de l'équateur.

Le réseau *Ellipso* devrait être le moins onéreux de tous : sa construction coûtera six milliards de francs seulement. Les satellites seront analogues à ceux du réseau *Globalstar*, chacun possédant 61 faisceaux, ainsi que de simples répéteurs transpondeurs qui ne font que transmettre le signal reçu, mais sur une autre fréquence. Chaque satellite aura une masse de 700 kilogrammes et une durée de vie comprise entre cinq et sept ans.

Le réseau ICO devrait être opérationnel en l'an 2000. C'est la seule constellation sur des orbites circulaires intermédiaires. Les ingénieurs du projet ICO ont choisi d'utiliser 163 faisceaux par satellite, afin de fiabiliser la liaison avec les téléphones portables. Un si grand nombre de faisceaux sera assuré par des antennes à conjugaison de phase, où l'on module la phase de l'onde pour créer des interférences constructives qui formeront les faisceaux. Les signaux alimentant les éléments seront calculés par ordinateur, de manière que leur combinaison engendre l'un des 163 faisceaux. L'or-



Slim Films

3. LE SYSTÈME ASTROLINK se composera de neuf satellites géostationnaires placés en cinq positions. C'est l'un des sept projets de réseaux pour la transmission des données, essentiellement pour l'Internet. Six de ces projets prévoient l'utilisation de satellites

géostationnaires que l'on peut joindre facilement avec des équipements ne nécessitant pas de suivre le satellite dans sa traversée du ciel. Moins coûteux, ces équipements pourraient avoir la faveur des utilisateurs.

dinateur de bord calculera également vers quel faisceau les signaux provenant de la passerelle terrestre doivent être dirigés. Cet ordinateur de bord sera le plus complexe jamais embarqué dans un véhicule spatial et consommera près de deux kilowatts, soit une bonne partie de la puissance disponible du satellite.

Toutes ces constellations fonctionneront-elles? En confiant aux satellites une quantité de calculs importante, les concepteurs des réseaux *Iridium* et *ICO* prennent un risque technique notable. Aujourd'hui, seuls trois satellites ont été équipés d'ordinateurs de puissance respectable. L'un est réalisé par la NASA et les deux autres par des Italiens pour leurs véhicules spatiaux expérimentaux. De surcroît, le projet *Iridium* n'est viable que s'il attire environ un million d'hommes d'affaires... dont les besoins futurs pourraient être satisfaits autrement, par exemple par des téléphones cellulaires qui s'adapteraient aux différents standards nationaux.

Le réseau *Globalstar* semble celui qui a le plus de chances de succès, car sa construction ne coûtera pas trop cher et les stations terrestres seront payées par les opérateurs concessionnaires dans chaque pays. Ces opérateurs aideront l'implantation sur leur marché local. La croissance des autres systèmes pourrait être freinée par la concurrence : ils n'arriveront sur le marché que plusieurs années après. Il sera également difficile à *Ellipso*, ainsi qu'à *ECCO* de trouver les financements nécessaires, ce qui laissera en tête *Iridium*, *Globalstar* et *ICO*.

L'attitude des clients sera naturellement déterminante. Habitué à la qualité des réseaux cellulaires terrestres et à leur importante diffusion, certains pourraient boudier les téléphones par satellites et leurs communications fragiles. D'autres pourraient acheter un téléphone par satellites pour des raisons de sécurité (pour des déplacements dans des endroits reculés, par exemple) et ne les utiliser que rarement.

La transmission de données

Dans de nombreux pays industrialisés, la dérégulation des télécommunications a suscité une activité industrielle considérable. La principale raison de cette croissance d'activité est le succès du réseau Internet : dans le monde, on estime que le nombre de foyers

raccordés au réseau Internet passera de 50 millions aujourd'hui à plus de 150 millions en l'an 2000. À cette époque, le marché de la fourniture d'accès à l'Internet pourrait ainsi s'élever à plus de 50 milliards de francs. L'usage professionnel de l'Internet devrait croître de manière encore plus spectaculaire, car les entreprises se dotent de leurs propres réseaux semi-privés, nommés «intranets». Le marché de la fourniture de bande passante pour les entreprises, qui était de cinq milliards de francs en 1996, pourrait s'élever à 150 milliards en l'an 2000.

Plusieurs réseaux par satellites ont été conçus en vue de répondre à cette demande. En raison de l'encombrement des fréquences, ces réseaux utiliseront des fréquences différentes de celles utilisées dans les mobiles terrestres. Ils opéreront dans une bande de fréquence plus élevée, la bande Ka (cette appellation est issue des désignations codées de la Seconde Guerre mondiale). Le choix de cette bande s'est imposé : quelles que soient les orbites des satellites, l'utilisation de toute autre bande provoque des interférences entre satellites. Plus de 50 projets utilisant près de 170 satellites sur des positions géostationnaires et utilisant la bande Ka ont été proposés. La plupart de ces projets auront une couverture nationale ou régionale.

Dans la bande Ka, les longueurs d'onde sont comprises entre 1 et 1,5 centimètre (fréquence comprise entre 20 et 30 gigahertz). Son principal défaut est l'atténuation du signal par la pluie, et c'est pourquoi cette bande a été jusqu'ici réservée à quelques satellites expérimentaux. Ce problème de l'atténuation devrait être contourné, notamment par des algorithmes de correction d'erreurs, et les ingénieurs prédisent une disponibilité comprise entre 99,5 et 99,9 pour cent.

Sept systèmes américains encore au stade de projet pourraient transmettre des données dans le monde entier. Trois sont fondés entièrement ou partiellement sur des satellites en orbite basse ou moyenne, les quatre autres sur des satellites géostationnaires.

En raison du nombre élevé de satellites à envoyer, les deux projets avec des orbites basses seront les plus coûteux. Ainsi, avec ses 288 satellites tournant à 1 400 kilomètres d'altitude, *Teledesic* sera la constellation la plus nombreuse et la plus onéreuse. Le besoin d'un tel nombre de satellites

résulte de la position de l'orbite, mais également de la nécessité de minimiser l'atténuation provoquée par la pluie. La zone couverte par chaque satellite sera limitée à un cône étroit.

Le projet *Celestri* de la Société *Motorola* est comparable à *Teledesic*, en terme de complexité et de coût. Le système utilisera une constellation de 63 satellites placés à 1 400 kilomètres d'altitude, ainsi que neuf satellites géostationnaires. La partie géostationnaire sera employée par des clients dont le trafic n'est pas pénalisé par les temps de transmission. Le réseau offrira des accès à très haut débit, entre 64 kilobits par seconde et 155 mégabits par seconde ; ce sera un concurrent sérieux du réseau *Teledesic*.

Les autres systèmes fondés sur des satellites géostationnaires sont plus modestes, avec des coûts estimés entre 5 milliards et 40 milliards de francs. Les projets les moins complexes, celui de la Société *Loral* et celui de la Société *Morning Star Satellite*, ne prévoient que la couverture d'une partie du Globe avec trois et quatre satellites seulement. À l'autre extrémité de l'échelle des prix, celui de la Société *Hughes* s'articule autour de 16 satellites géostationnaires, complétés par 20 satellites sur des orbites intermédiaires.

Des sept projets américains proposés, deux ou trois aboutiront. Non pas que les autres soient moins bons, mais ils ne pourront vraisemblablement pas financer leur projet. Comparés aux projets de transport de la parole que nous avons évoqués précédemment, ces projets sont beaucoup plus risqués, car la demande est moins nette : ceux qui ont besoin de trouver des capitaux sont handicapés par rapport aux entreprises capables de démarrer les projets avec leurs propres ressources. Aujourd'hui, les projets les plus avancés sont ceux des sociétés *Loral*, *Lockheed Martin*, *Motorola* et *Teledesic*.

Au-delà de la bande Ka

Alors que la conception des systèmes utilisant la bande Ka commence, les entreprises ont déjà demandé à la FCC des autorisations pour exploiter des systèmes fonctionnant à des longueurs d'onde encore plus courtes, entre six et huit millimètres (entre 37 et 50 gigahertz, aussi nommée la bande Q/V). Plus de 14 demandes ont été faites.

Cette bande de longueurs d'onde inférieures intéresse les opérateurs, même si l'atténuation y est encore plus importante : dans une atmosphère aride, les molécules d'air absorbent ces ondes. Ainsi, les signaux dont la longueur d'onde est de six millimètres sont atténués d'un facteur trois ou quatre pour des trajets dont l'angle au-dessus de l'horizon est inférieur à 20 degrés. Pour ajouter aux difficultés, les circuits électroniques fonctionnant à ces courtes longueurs sont onéreux. La bande Ka sera vraisemblablement utilisée complètement avant qu'un système fonctionnant à ces courtes longueurs d'onde ne soit construit.

Ce développement des constellations de satellites bouleversera notre mode de vie. D'ici l'an 2000, nous pourrions appeler n'importe qui sur la planète à l'aide d'appareils analogues aux téléphones portables actuels. Pour le meilleur ou pour le pire, nous ne pourrions plus être isolés.

Ces services profiteront naturellement au commerce, au tourisme et à ceux qui ont les moyens de les payer, dans les pays où ils n'existent pas encore. On pourra alors vivre loin de tout, mais participer à la vie culturelle du monde, par l'Internet ou d'autres services multimédias fournis à des débits suffisamment élevés pour obtenir de la vidéo à la demande. Le monde sera-t-il aussi plus grand, plus petit ou plus intéressant ? À chacun de répondre.

John EVANS est vice-président de la Société *Comsat*.

Personal and Mobile Radio Systems, sous la direction de R.C.V. Macario, Peter Peregrinus on behalf of IEEE, 1991.

G. MARAL et M. BOUSQUET, *Satellite Communications Systems*, John Wiley & Sons, 1993.

John V. EVANS, *Satellite Systems for Personal Communications*, in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 39, pp. 7-10, juin 1997.

John V. EVANS, *Telecommunication Satellite Systems of the Future*, in *Encyclopedia of Telecommunications*, vol. 16, 1998, à paraître.

Des informations complémentaires sur les projets cités sont accessibles sur notre site Web :

<http://www.pourlascience.com/numeros/pls-248/sommaire.htm>

JOSEPH PELTON

58

rieur à celui du service téléphonique classique nécessitaient d'encombrantes antennes paraboliques. De surcroît, ces liaisons étaient peu nombreuses et coûtaient environ 60 francs par minute. Aujourd'hui, la qualité et la quantité de données à haut débit en provenance de l'espace s'accroissent. Le progrès profite à de nombreux individus, aux entreprises du monde entier et, plus particulièrement, aux pays qui ne possèdent pas de réseaux denses en fibres optiques, tels la Chine ou le Brésil.

L'antenne, clé du progrès

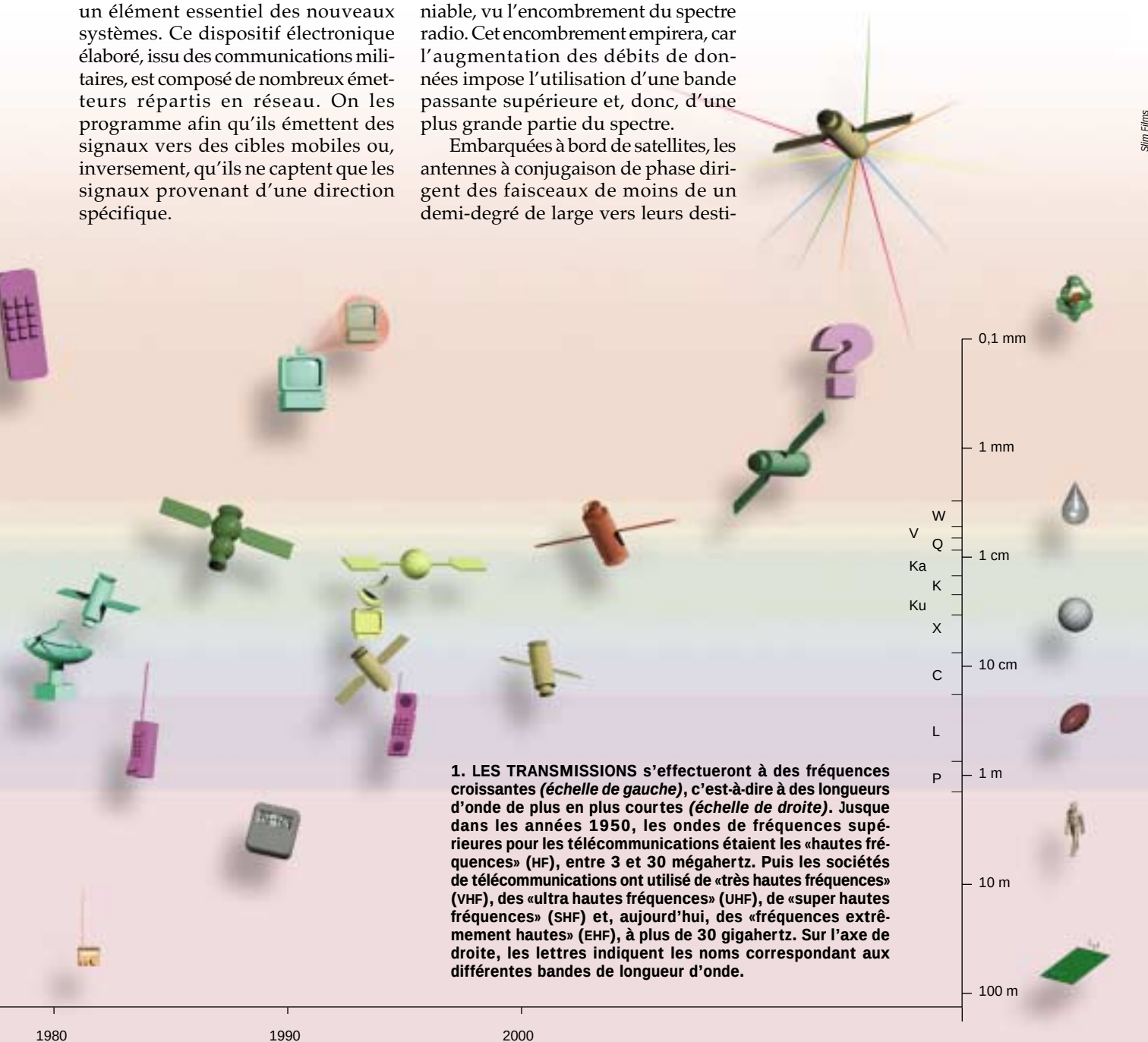
L'antenne à conjugaison de phase est un élément essentiel des nouveaux systèmes. Ce dispositif électronique élaboré, issu des communications militaires, est composé de nombreux émetteurs répartis en réseau. On les programme afin qu'ils émettent des signaux vers des cibles mobiles ou, inversement, qu'ils ne captent que les signaux provenant d'une direction spécifique.

Dans leur principe, ces antennes fonctionnent comme des fentes dans un écran éclairé par une lampe : derrière l'écran, dans des directions spécifiques, les interférences conduisent à des extinctions, ou à des éclaircissements. Pour changer la direction d'émission, les antennes à conjugaison de phase ajoutent électroniquement de courts retards aux signaux qui sont émis par les différents éléments de l'antenne (pour changer la direction de réception, elles ajoutent ces retards aux signaux reçus). Ainsi, en utilisant le phénomène d'interférence, on limite les interférences destructrices entre ondes émises par des sources différentes, ce qui est un avantage indéniable, vu l'encombrement du spectre radio. Cet encombrement empirera, car l'augmentation des débits de données impose l'utilisation d'une bande passante supérieure et, donc, d'une plus grande partie du spectre.

Embarquées à bord de satellites, les antennes à conjugaison de phase dirigent des faisceaux de moins de un demi-degré de large vers leurs desti-

nataires. Mieux encore, elles s'adaptent aux circonstances : commandées par des superordinateurs embarqués gros comme une boîte à chaussures, elles pourront être continuellement reprogrammées. Cette flexibilité est apparue, il y a une dizaine d'années, avec des antennes paraboliques modifiées, et les ingénieurs l'utilisent chaque jour davantage. Dans les satellites du XXI^e siècle, de multiples faisceaux utiliseront simultanément la même bande spectrale. Déjà, cette «réutilisation» est d'un facteur 100 sur certains satellites et, à terme, elle pourrait atteindre un facteur 1 000.

Les antennes à conjugaison de phase s'imposeront également au



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.

lium, dirigés par des robots et stabilisés par des moteurs à propulsion ionique ; les plates-formes alimentées par l'énergie solaire ou par des piles à combustible ; les plates-formes à hélice et les plates-formes à moteurs à réaction. Toutes ces approches ont des limitations différentes : les plates-formes solaires ou à pile à combustible ne seront possibles que si les rendements de la conversion d'énergie augmentent ; celles qui utilisent un carburant ne resteront en l'air que quelques jours, avant de descendre se réapprovisionner.

Pourrait-on envisager l'utilisation de fréquences si élevées que la quantité de données transportées satisfasse les services à large bande, même sans réutilisation ? Malheureusement, aux fréquences élevées, les ondes électromagnétiques sont atténuées, car les longueurs d'onde sont comparables à la taille des gouttelettes d'eau dans l'atmosphère. Le phénomène est identique à celui qui fait paraître opaques les nuages quand la lumière visible interagit avec les microgouttes qui composent ceux-ci. Des techniques de corrections d'erreur ou une augmentation de la puissance éviteront les effets

de cette atténuation ; de même, on éviterait l'atténuation en utilisant plusieurs stations au sol, de sorte que les données suivent plusieurs chemins, mais toutes ces mesures ont un coût.

Avec des longueurs d'onde inférieures au millimètre, les difficultés empirent : les faisceaux infrarouges et visibles sont trop facilement absorbés par l'atmosphère, si bien que, dans le futur, ils seront surtout utilisés à l'intérieur des immeubles. Toutefois, des expériences réalisées avec un satellite japonais, au milieu des années 1990, ont montré la possibilité de communications par faisceaux laser avec des satellites : on transmettrait ainsi à débit élevé, en utilisant plusieurs stations au sol pour minimiser les pertes dues au mauvais temps.

Dans les 20 prochaines années, les systèmes de communications par ondes radio s'imposeront. Les laboratoires privés et publics ont beaucoup à faire pour mettre ces systèmes au point. Les universités, notamment, devront former des ingénieurs capables de résoudre les problèmes nouveaux que poseront les systèmes de télécommunications.

Avec quelques collègues, nous étudions la création d'un institut spécialisé dans le domaine des nouvelles techniques de télécommunications spatiales. Cependant, même si cet institut voit le jour, la rareté de scientifiques et d'ingénieurs compétents handicaperait l'enseignement. Recherchons ensemble des solutions, car les avantages d'une meilleure communication et d'une meilleure éducation sont incalculables pour toutes les nations.

Joseph PELTON enseigne les techniques de télécommunications à l'Université de Boulder (Colorado).

G.D. GORDON et W.L. MORGAN, *Principles of Communications Satellites*, Wiley-Interscience, 1993.

E.W. ASHFORD, *A European Strategy for Future Satellite Communications Systems*, in *Space Communications*, vol. 14, n° 3, pp. 151-154, 1996.

J.N. PELTON, *Overview of Satellite Communications*, in *Encyclopedia of Telecommunications*, vol. 14, Marcel Dekker, 1997.

Joseph N. PELTON et al., *Global Satellite Communications Technology and Systems*, WTEC, Baltimore, à paraître.



6. LES TOURS DU SYSTÈME CELLULAIRE (*petites structures au sol*) couvriront chacune une zone de quelques kilomètres. Certains réseaux de télécommunications combineront les systèmes cellulaires terrestres et satellitaires.

Les réseaux radio terrestres

ALEX HILLS

Les réseaux de téléphonie mobile s'étendent. Bientôt, ils permettront aussi aux ordinateurs d'échanger des données.

Rares il y a seulement cinq ans, les téléphones mobiles sont aujourd'hui partout dans les rues, les bureaux, les foyers... Environ sept millions de Français en possèdent un, soit 12 pour cent de la population, et 300 000 en acquièrent chaque mois. Une personne sur 30 est abonnée à un service de radiomessagerie. Dans les pays en développement, encore peu équipés en lignes téléphoniques, la mise en place de systèmes de télécommunications hertziens serait moins coûteuse et plus rapide que la pose de câbles. La demande en moyens de communication transportables, ergonomiques et bon marché semble considérable.

Les réseaux de radiotéléphones se déploient à différentes échelles : du simple téléphone sans fil domes-





tique aux systèmes globaux de satellites, en passant par les réseaux radio privés à l'intérieur des immeubles ou des campus, et par les réseaux cellulaires qui desservent les villes, les régions ou les pays. Les réseaux de transferts de données sont également de tailles variées, avec des vitesses de communication qui dépendent de leur taille : les réseaux locaux transmettent jusqu'à deux mégabits par seconde (un bit est une unité élémentaire d'information), tandis que les réseaux de radiomessagerie et les réseaux radio de «paquets» à deux voies (les flux de données sont tronçonnés en paquets qui sont adressés au destinataire) ont un débit inférieur à 19,2 kilobits par seconde sur des zones de la taille d'une ville. Ces réseaux sont souvent utilisés par les entreprises à l'intérieur desquelles le personnel se déplace fréquemment.

Les débits des liaisons radio sont limités par des contraintes physiques : la déformation du signal au cours de la propagation impose une bonne séparation temporelle des informations émises afin qu'elles restent bien séparées à la réception. Aussi les utilisations qui résultent d'échanges de données à grand débit, tels la vidéo et le multimédia, nécessitent des réseaux câblés. De plus, les réseaux radio seront toujours plus chers, car ils ont besoin du support d'une infrastructure câblée et d'équipements de réception et de transmission.

Ces inconvénients n'expliquent toutefois pas que la transmission radio de données reste bien moins utilisée que la radiotéléphonie. Aux États-Unis, trois pour cent seulement des communications entre terminaux mobiles seraient des échanges de données, et cette proportion n'est pas supérieure en Europe ni au Japon. Les services de radiomessagerie n'utilisent qu'une toute petite partie du potentiel des

1. DES ORDINATEURS MOBILES, ergonomiques et légers, communiqueront bientôt par radio, comme les téléphones cellulaires.