

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.

transferts de données par radio. Cette sous-utilisation est due en grande partie à la nouveauté relative des ordinateurs et, encore plus, des communications entre ordinateurs ; le téléphone mobile, lui, diffère peu du téléphone câblé que nous utilisons depuis le début du XX^e siècle, et auquel nous avons eu le temps de nous habituer.

À quelles conditions les transmissions de données par radio se développeront-elles ? Le téléphone mobile ne s'est imposé que lorsque les combinés ont été miniaturisés : trop gros,

les premiers téléphones mobiles, au début des années 1980, n'étaient utilisables que dans des voitures ou dans des camions, et leur usage était essentiellement professionnel. Or, la taille des ordinateurs a beaucoup diminué depuis quelques années : aujourd'hui, certains tiennent dans le creux de la main, et ils sont de plus en plus souvent équipés d'un émetteur-récepteur qui permet l'accès au réseau Internet ou à d'autres réseaux de données similaires au cours de déplacements. Ainsi, un appareil de 435 grammes, qui assure

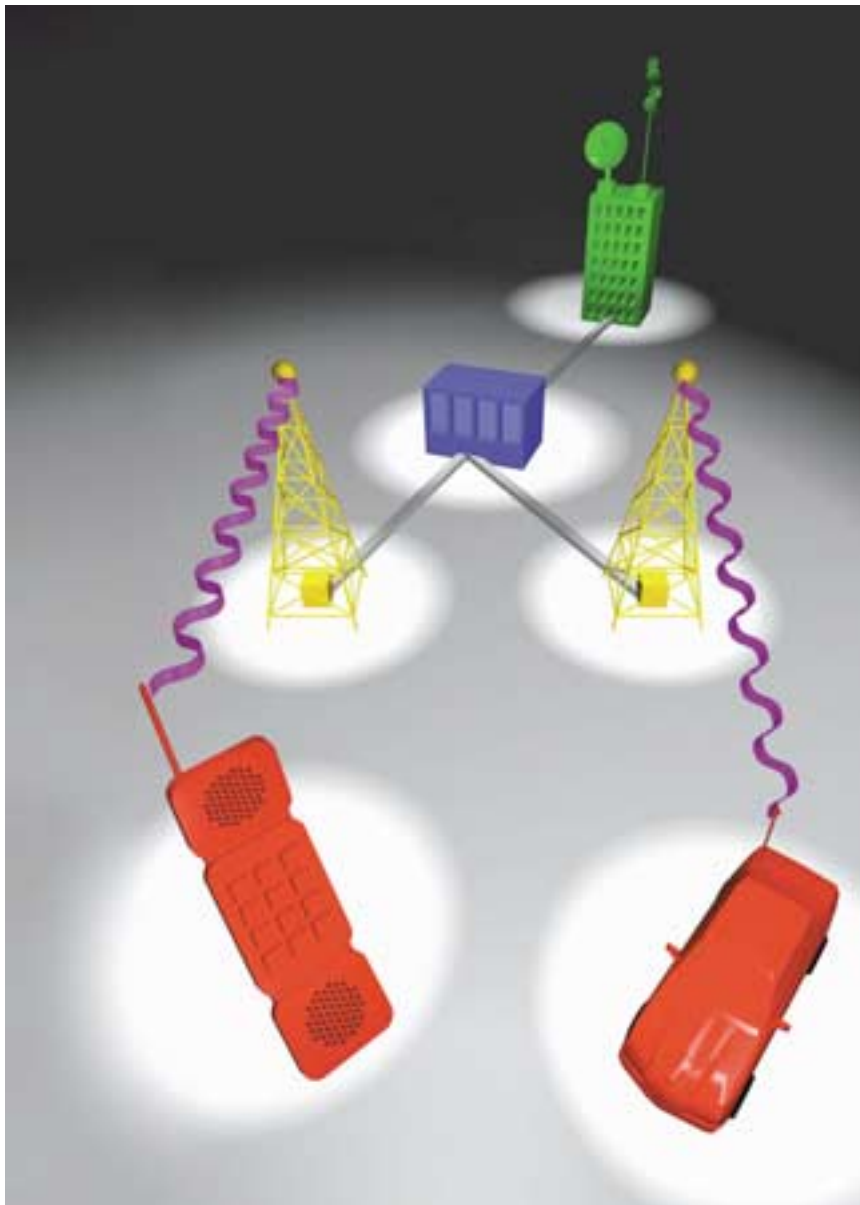
les fonctions de radiotéléphone, de terminal Internet, de télécopieur, de récepteur de radiomessagerie et d'agenda, a été commercialisé en 1996.

Trouver un langage commun

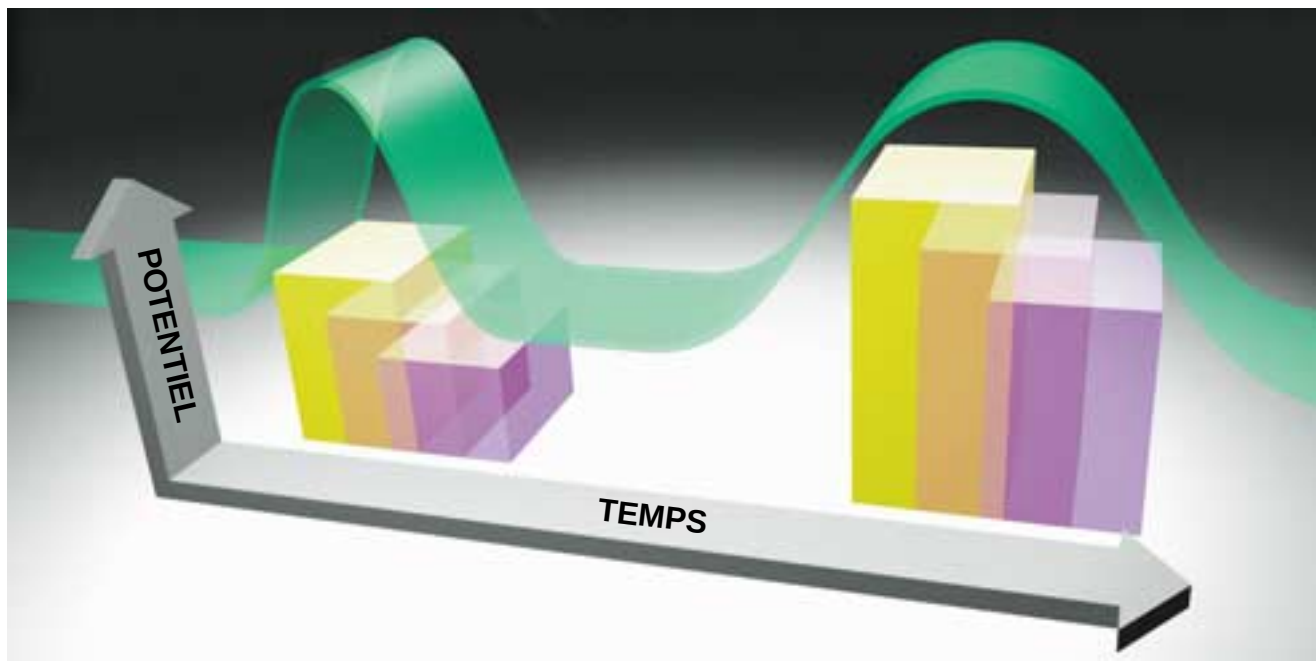
L'absence de normes de communication entre les ordinateurs portables et les réseaux de communications limite aussi le développement des transferts de données par radio. Aujourd'hui, les usagers ont le choix entre de nombreuses possibilités, dont aucune ne satisfait tous leurs besoins. Un réseau local qui couvre un immeuble ne communique pas de la même façon qu'un réseau qui couvrirait toute une ville, et il existe même plusieurs possibilités pour ce dernier. Toutefois, en juin 1997, l'Institut américain des ingénieurs en électricité et en électronique (IEEE) a adopté une norme pour les réseaux locaux : les constructeurs du monde entier sont ainsi encouragés à fabriquer des équipements compatibles qui communiqueraient avec de nombreux réseaux locaux et pas uniquement avec leurs propres systèmes. La norme admet deux techniques de transmission différentes, mais les usagers pourront se décider pour l'une des deux : c'est à eux que revient en pratique le choix de la norme qui sera effectivement utilisée dans les prochaines années. En Europe, une norme similaire, nommée *Hiperlan*, est étudiée.

Techniquement, la transmission radio de données est au point : nous la testons à l'Université Carnegie Mellon, avec un prototype de réseau local, qui couvre la moitié du campus et qui est relié à un réseau commercial, plus lent, qui s'étend sur la zone urbaine de Pittsburgh. Les utilisateurs se déplacent avec leur ordinateur portable et l'utilisent exactement comme un ordinateur de bureau.

La principale tâche des concepteurs de réseaux radio est la réduction des interférences provoquées par le bruit radio et par les réflexions multiples du signal. Les signaux radio réfléchis par les immeubles, les voitures ou le sol provoquent un phénomène nommé «affaiblissement par trajets multiples» : selon la longueur des différents chemins parcourus, le signal dévié arrive à l'émetteur plus ou moins longtemps après le signal principal, et donc déforme plus ou moins celui-ci (voir la figure 3). L'importance de ce phénomène dépend de



2. LES RÉSEAUX CELLULAIRES relient par radio des utilisateurs (en rouge) à des stations de base (en jaune). Chaque station est au centre d'une cellule de quelques kilomètres carrés et utilise des fréquences différentes de celles des stations voisines pour éviter les interférences. Elle est connectée par des câbles à fibres optiques à un central de commutation téléphonique pour mobiles (en bleu), qui trouve les destinataires et maintient actives les connexions (en violet). Ce central est lui-même relié à un commutateur du réseau téléphonique public (en vert), qui achemine les appels n'importe où dans le monde en utilisant des satellites, des câbles ou des micro-ondes.



3. UN SIGNAL RADIO EST DÉFORMÉ lorsqu'il parcourt plusieurs trajets différents entre l'émetteur et le récepteur : les bits de données qui arrivent au récepteur sont retardés (*cubes violets et orange*) par des réflexions sur des immeubles, sur des voitures

ou sur le sol, parce que leur trajet est un peu plus long que celui des bits qui arrivent directement (*cubes jaunes*). Le signal déformé, qui résulte de l'addition de tous les bits, peut être mal interprété par le récepteur.

la fréquence et varie lorsque le récepteur se déplace : il est connu des automobilistes, qui entendent le son de leur autoradio s'affaiblir par endroits ou qui captent moins bien les stations dans les tunnels. Toutefois, cet affaiblissement, qui se corrige facilement dans les récepteurs radio reliés à une antenne et alimentés par la batterie d'une voiture, devient très gênant quand chaque donnée échangée détermine la cohérence de la transmission et quand la puissance des signaux émis est inférieure à un demi-watt (une puissance d'émission supérieure réduirait trop l'autonomie des ordinateurs).

Dans les téléphones portables, on réduit les erreurs de transmission en numérisant la voix avant de la transmettre : 8 000 fois par seconde, l'amplitude du signal est mesurée, et sa valeur est codée par une suite de huit bits qui prennent la valeur zéro ou un (voir la figure 4). Puis, souvent, l'électronique comprime la séquence obtenue, 64 000 bits par seconde, afin de réduire le nombre de bits qui doivent être envoyés. Le récepteur décode la séquence de bits pour reconstituer le signal original. Comme un bit ne prend que deux

valeurs, la numérisation réduit la probabilité d'une erreur.

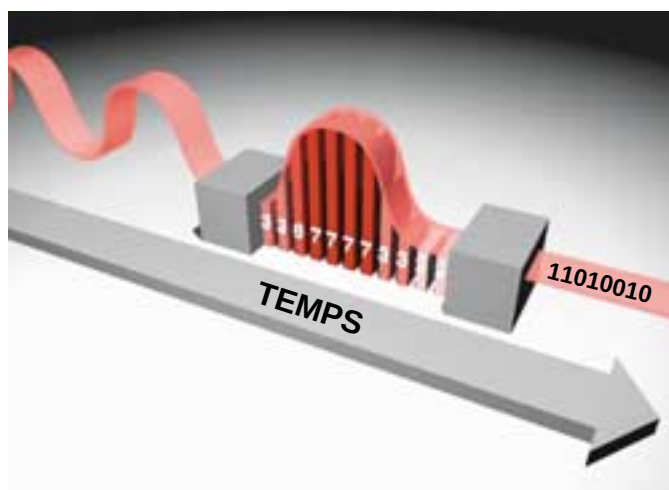
Des bits de correction d'erreur

Toutefois, les trajets multiples étalent dans le temps l'arrivée des bits, ce qui déforme le signal et limite la vitesse de transmission. On ajoute donc des bits de correction d'erreur dont les valeurs dépendent de celles des bits du signal qu'ils accompagnent. Le récepteur éva-

lue ces bits spéciaux et, comme il connaît les règles qui les ont engendrés et les erreurs les plus fréquentes, il corrige les désaccords.

Cette technique de correction d'erreur est efficace pour la transmission de la parole : si quelques erreurs subsistent malgré tout, le système auditif de celui qui reçoit la communication les corrige inconsciemment. Toutefois, pour la transmission de données, la moindre erreur peut se révéler catastrophique, parce que l'ordinateur qui reçoit le signal ne peut pas savoir que celui-ci a été déformé.

Une autre technique utilisée dans les réseaux locaux (souvent en association avec les bits de correction d'erreur) pour combattre le bruit et les conséquences des trajets multiples est l'étalement de spectre : le signal est transmis simultanément sur un grand nombre de fréquences radio. Comme l'affaiblissement et les déformations dus aux trajets multiples dépendent de la fréquence, le message passe sans déformation, au moins sur quelques fréquences. De même, une personne ayant un déficit auditif détecte plus facilement le mot «alléluia» en écoutant le *Messie* de Haendel, où ce mot



4. LA VOIX EST CODÉE sous forme numérique par les systèmes modernes de télécommunications. Le signal analogique (*ruban rose à gauche*) est mesuré des milliers de fois par seconde, et le résultat est exprimé par un nombre (*barres verticales du centre*). Ces nombres sont ensuite convertis en groupes de huit bits (ou chiffres binaires 0 ou 1) qui sont transmis (*ruban rose à droite*).

est émis à plusieurs fréquences différentes, allant du soprano à la basse, que si une seule personne le prononce.

Le «saut de fréquence» est un raffinement de l'étalement du spectre : l'émetteur change de fréquence toutes les quelques millisecondes. Le récepteur connaît la séquence de changement et la suit. Même si quelques paquets de données ne passent pas, les autres sont reçus. Lors des transmissions de données, le récepteur peut alors demander que les données erronées soient transmises à nouveau.

La séquence directe est une autre technique d'étalement de spectre, où chaque bit est converti en une séquence de bits, connue à la fois de l'émetteur et du récepteur (voir *L'occupation du spectre radio*, par David Hughes et Dewayne Hendricks, page 72). Le bit 1 peut être converti en 000100110101111 et le bit 0 en 111011001010000, séquence inverse, facilement discernable de la première. Cette opération crée plus de bits par seconde qu'il n'y en avait au départ : on doit alors transmettre le signal sur un plus grand nombre

de fréquences. Les interférences et l'affaiblissement dus aux trajets multiples sont ainsi éliminés, et le récepteur peut reconstruire les données initiales avec une grande sûreté.

Le partage des fréquences

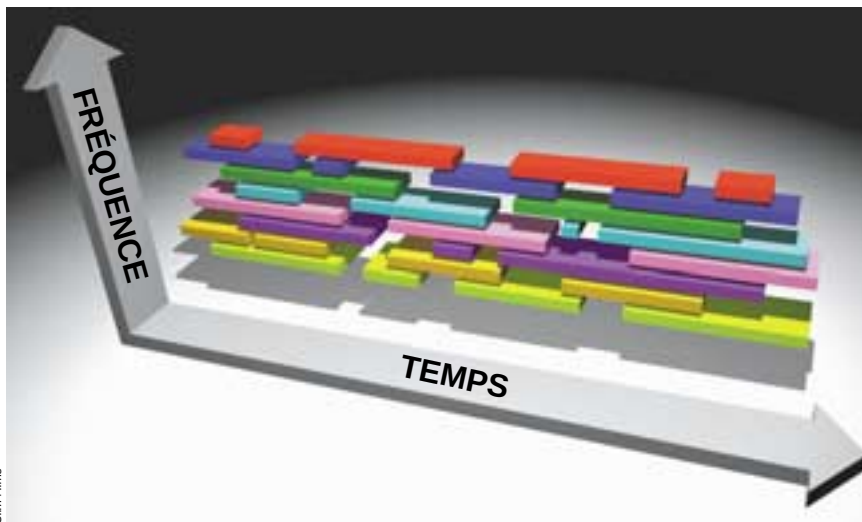
L'autre grande difficulté dans la mise au point de réseaux par radio est la répartition du petit nombre de fréquences radio disponibles entre le maximum d'utilisateurs. Beaucoup de ces réseaux reposent sur le principe de la réutilisation des fréquences : les canaux radio disponibles sont répartis en sous-ensembles, dont un seul est utilisé sur une zone géographique donnée (la cellule), et l'on n'attribue le même sous-ensemble de fréquences qu'à des cellules éloignées.

Les cellules, dont la taille est définie par l'espacement de stations de base fixes, ont généralement deux kilomètres de diamètre dans les zones urbaines, plus dans les campagnes. Dans les zones très denses, la capacité des réseaux cellulaires est augmentée par l'utilisation de microcellules, de 500 mètres de rayon environ.

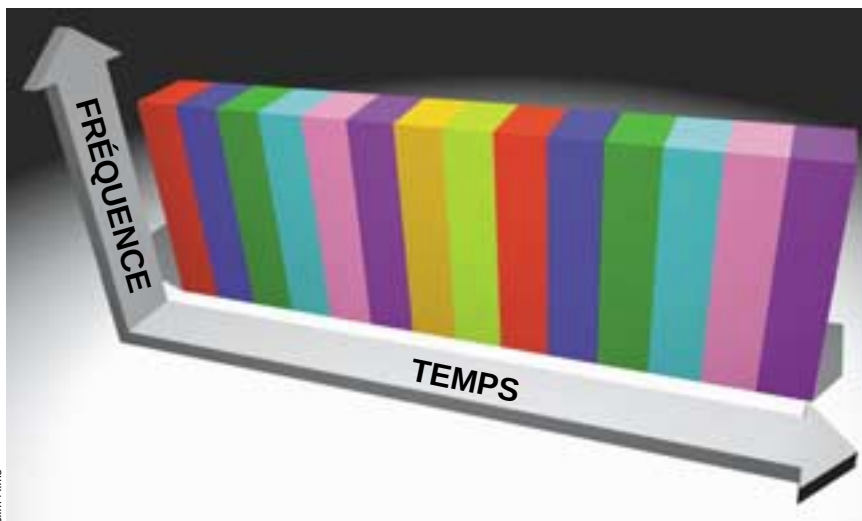
Les stations de base utilisent diverses méthodes pour séparer les signaux provenant de différents émetteurs. La plus simple et la plus utilisée est celle de l'accès multiple par répartition de fréquence : une fréquence particulière est attribuée à chaque appareil mobile (voir la figure 5). La station de base sait quel mobile utilise quelle fréquence et trie les signaux exactement comme nous choisissons notre station de radio préférée en tournant le bouton du transistor jusqu'à la bonne position.

La numérisation des communications permet le partage d'une même fréquence entre plusieurs utilisateurs. Dans l'accès multiple par répartition du temps, chaque appareil mobile émet ou reçoit dans des tranches de temps d'une milliseconde (voir la figure 6). La station de base sait quel appareil émet dans chaque tranche de temps et il reconstitue le message à partir des morceaux ainsi envoyés.

L'accès multiple par répartition de code est un procédé concurrent. Son principe ressemble à celui de l'étalement du spectre par séquence directe, mais la séquence qui remplace chaque bit est plus longue : plus de 100 bits au lieu d'une dizaine. Chaque appareil mobile possède son codage propre, ce qui permet à plusieurs utilisateurs



5. L'ACCÈS MULTIPLE PAR RÉPARTITION DE FRÉQUENCE est la méthode la plus simple pour que plusieurs utilisateurs (couleurs) communiquent simultanément par radio dans une même zone géographique : une fréquence particulière est attribuée à chacun. En écoutant toutes les fréquences utilisées (en ordonnée), le récepteur sépare les différentes sources, comme un auditeur sélectionne une station de radio en tournant le bouton d'accord de son poste. On a représenté ici des signaux intermittents, car les canaux ne sont pas utilisés en permanence.



6. L'ACCÈS MULTIPLE PAR RÉPARTITION DU TEMPS est une autre technique de partage du spectre radio. Chaque utilisateur (couleurs) émet ou reçoit pendant une fraction de milliseconde (barres verticales). Les données numériques provenant de chaque émetteur sont comprimées et envoyées simultanément sur plusieurs fréquences pendant cet intervalle de temps. Le récepteur sait précisément quand les signaux sont émis ou reçus, et il peut donc les séparer.

de transmettre en même temps sur la même plage de fréquences (voir la figure 7). La station de base teste le flux de données arrivant sur cette plage de fréquences et détermine les corrélations dans les séquences de chaque mobile afin de retrouver quels bits sont envoyés par chacun. Beaucoup de fournisseurs de télécommunications hertziennes utilisent l'accès multiple par répartition de code, souvent en association avec l'accès multiple par répartition de fréquence : la coexistence des deux systèmes, sur des appareils mobiles polyvalents, facilite le transfert vers les nouvelles bandes de fréquence et les nouvelles techniques d'accès multiple.

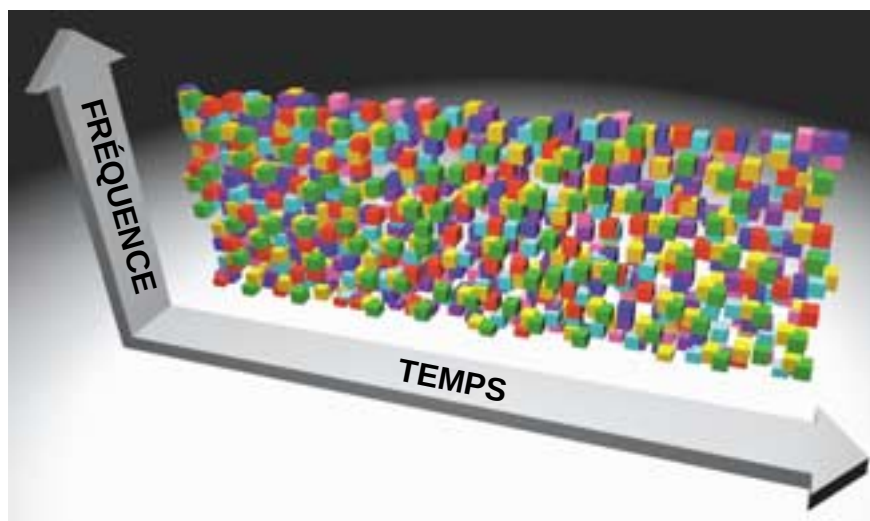
Des réseaux compatibles

La transmission de données par radio sera favorisée par l'interopérabilité des réseaux : l'utilisateur ne se rend pas compte que ses communications passent d'un réseau à un autre et n'a pas besoin de connaître les spécificités de chacun. Nous testons aujourd'hui une telle interopérabilité à l'Université Carnegie Mellon : un réseau hertzien local est relié à un réseau cellulaire qui s'étend sur Pittsburgh, la ville voisine. À notre connaissance, le réseau local est le plus grand qui ait jamais été construit : il compte aujourd'hui 100 stations de base et transporte des données à deux mégabits par seconde sur la moitié du campus. Le réseau cellulaire ne fonctionne qu'à 19,2 kilobits par seconde.

Les usagers accèdent au réseau Internet ou à d'autres réseaux, à l'aide d'ordinateurs ou d'autres machines portables, tout en se déplaçant : les connexions radio sont gérées automatiquement par les ordinateurs. Les utilisations les plus fréquentes sont les accès au courrier électronique et au réseau Internet. L'ordinateur mobile devient aussi fonctionnel que l'ordinateur de bureau, mais plus pratique.

Quelles difficultés avons-nous rencontrées? Lorsqu'un usager se déplace, l'ordinateur doit maintenir la meilleure connexion possible : la communication est parfois passée d'un réseau à l'autre. Nous avons écrit un programme qui rend ce passage imperceptible à l'utilisateur.

Par ailleurs, beaucoup d'ordinateurs fonctionnent suivant le principe client-serveur : le terminal de l'utilisateur va chercher les données conte-



7. L'ACCÈS MULTIPLE PAR RÉPARTITION DE CODE permet à plusieurs utilisateurs (couleurs) de partager efficacement le spectre des fréquences radio : le signal provenant de chaque utilisateur est codé et étalé sur tout le spectre radio (verticalement). Cet étalement permet à chaque signal de ne pas se superposer aux autres. Le récepteur débrouille les signaux individuels grâce à leurs codes uniques.

nues dans un ordinateur central. Le débit de la transmission par radio est plus faible que celui des réseaux câblés et plus d'erreurs y apparaissent. Nous avons donc adapté la structure des fichiers ainsi distribués pour rendre les communications plus fiables.

Nous construisons aussi des ordinateurs mobiles, ainsi que des ordinateurs que les utilisateurs portent sur eux comme des vêtements, et qui les assistent dans leurs déplacements ou dans leurs activités professionnelles. Ces ordinateurs portables sont équipés pour la radio, et nous espérons qu'un jour ils seront intégrés dans des réseaux interopérables.

Notre expérience n'est qu'un premier pas vers la mobilité des ordinateurs. Nous étendrons notre prototype à la totalité du campus en 1999 ; puis nous relierons notre réseau à des réseaux analogues, bientôt installés ailleurs, puis aux réseaux par satellites et aux réseaux cellulaires. Ensemble, ils formeront un réseau de transmissions international.

Toutes ces innovations étendent le potentiel des communications. Dans les pays industrialisés, la fiabilité du service téléphonique est primordiale. La téléphonie mobile l'assure avec peu d'installations lourdes et des équipes techniques réduites. Une ligne pour un système micro-cellulaire dans une zone urbaine dense coûte entre 1 000 et 3 500 francs, soit moins de la moitié de la pose d'une ligne d'un réseau câblé. Une fois installés, les systèmes hertziens

sont facilement adaptables pour des transmissions de données si le besoin s'en fait sentir.

Pour les pays en développement, nos études montrent que les constructeurs auront besoin de beaucoup plus de fréquences disponibles pour exploiter totalement le potentiel des systèmes hertziens. Nous avons aussi conclu que, étant donné les bénéfices que les services téléphoniques hertziens pourraient apporter, les gouvernements devraient mettre beaucoup plus de fréquences radio à leur disposition.

Alex HILLS est professeur de politique des télécommunications à l'Université Carnegie Mellon.

Mobile Computing at Carnegie Mellon, numéro spécial de *IEEE Personal Communications*, vol. 3, n° 1, février 1996.

Alex HILLS et Hung-Yao YEH, *Using Wireless Technology to Provide Basic Telephone Service in the Developing World*, in *Telecommunications Policy*, vol. 20, n° 6, pp. 443-454, juillet 1996.

Ingrid J. WICKELGREN, *Local-Area Networks Go Wireless*, in *IEEE Spectrum*, vol. 33, n° 9, pp. 34-40, septembre 1996.

Alex HILLS et Richard HOVEY, *A Wireless Infrastructure to Support Research Activities*, in *Wireless Personal Communications : The Evolution of Personal Communications Systems*, sous la direction de T.S. Rappaport et al., Kluwer Academic Publishers, 1996.

Les applications des réseaux cellulaires

WARREN STUTZMAN • CARL DIETRICH

La téléphonie a bénéficié de la technique cellulaire, mais bien d'autres applications de cette technique apparaîtront prochainement.

Dans les prochaines décennies, le réseau mondial de communications radio, par relais terrestres ou spatiaux, se développera pour satisfaire la demande croissante de communications rapides et mobiles. Initialement créé pour la transmission d'échanges vocaux, le réseau permet une foule d'usages nouveaux : localisation de personnes ou de biens, télé-surveillance, télécommande... Encore récemment, les systèmes radio semblaient réservés aux navigateurs professionnels, aux géomètres ou à quelques services techniques, mais les équipements sont devenus si bon marché et si petits qu'ils s'imposent dans la vie quotidienne.

La localisation

Pendant longtemps, les seules aides à la navigation ont été les étoiles, le sextant, le compas, la sonde, les cartes ou les gyroscopes. Puis les émetteurs radio terrestres du réseau LORAN (*Long Range Navigation*) ont permis aux marins et aux aviateurs de déterminer précisément leur position, mais ces systèmes ne couvraient pas l'ensemble du Globe et ils n'indiquaient pas l'altitude des récepteurs. Grâce aux satellites, on détermine aujourd'hui les trois coordonnées de position avec une étonnante précision.

Le Système de positionnement global (GPS) est sans doute le plus connu : 24 satellites en orbite autour de la Terre, à une altitude de plus de 20 000 kilomètres sur six plans orbitaux (voir *Pour La Science*, avril 1996), émettent en permanence des signaux qui peuvent être captés de n'importe quel point du

Globe. En mesurant le temps de propagation des signaux émis par au moins quatre satellites, les récepteurs GPS calculent la position à 18 mètres près, voire seulement à un mètre près quand ils reçoivent également les signaux d'un émetteur terrestre du voisinage.

Lors de la guerre du Golfe, les troupes qui combattaient l'Irak trouvèrent leur chemin dans le désert à l'aide du GPS. Depuis, le système est largement utilisé par les navigateurs, les géomètres ou les aviateurs. Les possibilités sont nombreuses : des automobiles équipées de récepteurs GPS, par exemple, calculent des itinéraires qui évitent les embouteillages, et des sociétés proposent aujourd'hui aux particuliers des récepteurs portables qui coûtent moins de 500 francs. Donnant une information de position dans les trois dimensions de l'espace, le système GPS permet également aux avions de voler plus directement vers leur destination sans être gênés par l'encombrement des couloirs aériens, et d'atterrir sans visibilité.

La Russie possède un système analogue au GPS : le GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), fondé sur une flotte de 24 satellites. Le dernier satellite de ce réseau a été envoyé en 1995, mais certains sont tombés en panne depuis. Avant la fin de l'année 1998, neuf satellites supplémentaires devraient augmenter la précision du réseau russe.

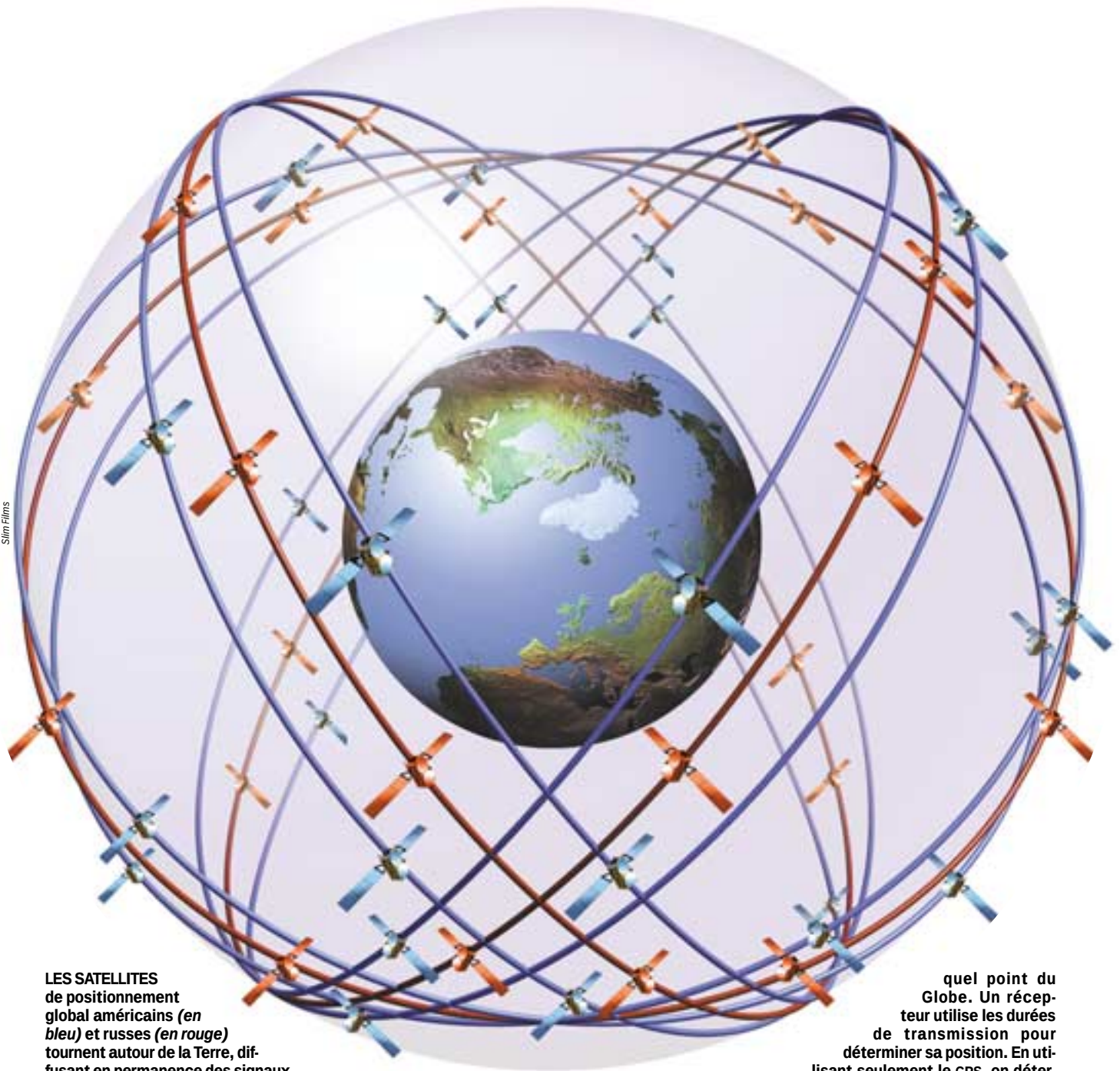
Lorsque le GLONASS sera complètement opérationnel, les récepteurs capables de recevoir à la fois ses signaux et ceux du GPS auront une précision considérablement améliorée, surtout dans les zones urbaines, où les bâtiments perturbent les réceptions.

Le système européen ENSS (*European Navigation Satellite System*), avec ses 15 satellites qui couvriront l'Europe et l'Afrique, devrait augmenter encore la précision des localisations dans ces zones. Quelques sociétés proposent des localisations par satellites ou à partir de balises terrestres, mais aucun n'est aussi précis que celui composé du GPS, du GLONASS et de l'ENSS.

Double sens

Malgré leurs performances, les dispositifs actuels de localisation ont un inconvénient majeur : ce ne sont que des émetteurs. Les personnes utilisant un récepteur GPS savent où elles sont, mais elles ne peuvent le faire savoir à d'autres. Un service de recherche de biens ou de personnes par satellites utilise le même principe que le GPS, mais à l'envers : c'est l'émetteur, au sol, qui envoie un signal, de sorte que les satellites enregistrent le temps mis par le signal pour leur parvenir ; un centre de calcul qui reçoit les informations des satellites détermine alors la position de l'émetteur. Des sociétés de transport utilisent aujourd'hui ce service pour surveiller les flottes de camions et déterminer la position des véhicules à moins de 300 mètres près.

Bientôt, les deux services seront réunis : les utilisateurs auront un dispositif de réception de signaux de requêtes émis par un satellite placé en orbite basse ; ils renverront un signal, via le satellite, à une station terrestre qui déterminera leur position. Par ce moyen, on localisera de jeunes enfants ou des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer.



LES SATELLITES
de positionnement
global américains (en
bleu) et russes (en rouge)
tourment autour de la Terre, dif-
fusant en permanence des signaux
qui peuvent être reçus en n'importe

quel point du
Globe. Un récep-
teur utilise les durées
de transmission pour
déterminer sa position. En uti-
lisant seulement le GPS, on déter-
mine la position à 18 mètres près.

Les réseaux hertziens terrestres permettent également des télécom- mandes : des sociétés proposent des systèmes qui utilisent les réseaux cel- lulaires pour commander des équi- pements et récupérer des signaux de mesure, par exemple. Ce type de sys- tèmes facilite notamment le travail des sociétés qui gèrent des distributeurs automatiques, parce qu'un poste cen- tral peut détecter les pannes et prévoir les remplissages. Bien d'autres appli- cations sont envisageables. Des com- pagnies pétrolières testent aujourd'hui des systèmes cellulaires pour contrô- ler les conduites de gaz et de pétrole

situées dans des contrées éloignées. L'administration du parc Monument Valley, dans la Vallée de la mort, aux États-Unis, utilise un réseau de com- munications par satellites pour con- naître le niveau d'eau dans le Trou du Diable, qui reste le seul endroit où vit le poisson du désert, en voie de dis- parition. Enfin les systèmes d'alarme permettent de lutter contre le vol et de secourir les particuliers : certains ser- vices d'urgence répondent aux appels téléphoniques et envoient les secours où ils sont nécessaires, même quand les personnes en détresse sont inca- pables de préciser où elles se trouvent.

Warren STUTZMAN et Carl DIETRICH travaillent au Centre de télécommu- nications de l'Institut Polytechnique de Virginie.

Walter F. BLANCHARD, *Introduction to Satellite Navigation*, in *International Journal of Satellite Communications*, vol. 12, n° 5, pp. 421-426, septembre- octobre 1994.

J.H. REED, K.J. KRIZMAN, B.D. WOER- NER et T.S. RAPPAPORT, *An Overview of the Challenges and Progress in Meeting the E-911 Requirement for Location Service*, in *IEEE Communications*, à paraître.

L'occupation du spectre radio

DAVID HUGHES • DEWAYNE HENDRICKS

Le regroupement d'informations en paquets numériques et leur transmission à plusieurs fréquences permet à des millions de personnes d'émettre et de recevoir en même temps.

Le bon sens tient pour acquis que l'espace radio est une ressource précieuse et limitée, qui doit être rationnée comme l'eau dans le désert : l'idée date des premières études de la transmission et de la réception, où l'on utilisait des bandes étroites du spectre électromagnétique afin de minimiser les interférences. Les gouvernements ont partagé et réglementé les canaux radio comme s'ils étaient des biens immobiliers. Certains pays ont été jusqu'à vendre aux enchères

des bandes de fréquences aux chaînes de télévision ou de radio, aux compagnies de taxis, aux compagnies aériennes, maritimes ou téléphoniques.

Toutefois les récents progrès des télécommunications numériques ont ouvert la porte d'un monde nouveau : les transmissions peuvent aujourd'hui utiliser des techniques d'étalement de spectre pour partager des canaux sans difficulté. L'information est codée par de petits paquets électroniques de 0 et de 1, et transmise par ondes

radio de façon que chaque paquet de faible puissance soit à une fréquence particulière. Des études récentes montrent que des millions d'utilisateurs peuvent théoriquement émettre à l'intérieur d'une même zone urbaine, en utilisant la même bande de fréquence, tout en envoyant des centaines de mégabits de données par seconde.

Les télécommunications devront s'habituer à ce nouveau partage du spectre. Naguère, tout en allouant des bandes de fréquences étroites pour

Les inventeurs inattendus du saut de fréquence

En 1941, l'actrice Hedy Lamarr et le musicien George Antheil déposent le brevet d'un «système de communications secrètes» destiné à aider l'armée américaine à guider les torpilles par radio : les signaux doivent être divisés en paquets émis à des fréquences différentes, choisies au hasard, afin que l'ennemi ne puisse les intercepter et les brouiller.

Née à Vienne, Hedwig Maria Eva Kiesler épousa d'abord Fritz Mandl, un fabricant d'armes qui travaillait pour Hitler ; le mariage avait été arrangé par les parents. Fier de sa femme,

Mandl l'emmenait à ses dîners d'affaires et à ses réunions, de sorte qu'elle fut bientôt au courant des techniques militaires allemandes. Après quatre années de mariage, elle quitta son mari pour se rendre à Londres, où le producteur de cinéma Louis Mayer, l'un des partenaires de la Société *Metro Goldwin Mayer*, détecta son talent et la persuada d'aller aux États-Unis.

Antheil, qu'elle rencontra à Hollywood, chercha avec elle un moyen de synchroniser les sauts de fréquence entre l'émetteur radio et le récepteur. Dans leur invention, qu'ils donnèrent au gouvernement américain, ils utilisaient deux rouleaux de papier analogues à ceux des pianos mécaniques, mais percés de trous conformément à une même séquence aléatoire. Un des rouleaux contrôlait l'émetteur placé dans le sous-marin, l'autre était embarqué avec le récepteur, dans la torpille.

Bien qu'ingénieux, ce dispositif était trop compliqué pour être utilisé durant la Seconde Guerre mondiale.

Néanmoins l'idée du saut de fréquence survécut et, vers la fin des années 1950, les fournisseurs de la Marine américaine utilisèrent les premiers ordinateurs pour commander et synchroniser les sauts de fréquence. Depuis, les militaires ont utilisé des ordinateurs plus rapides pour mettre en œuvre un principe fondé sur le saut de fréquence, dans les systèmes de communication par satellite. La technique est également mise en œuvre dans les téléphones cellulaires ou dans les services de communications personnelles.

L'ACTRICE HEDY LAMARR est un des deux auteurs d'un brevet pour une technique largement utilisée dans les téléphones cellulaires et dans les services de communications personnelles.



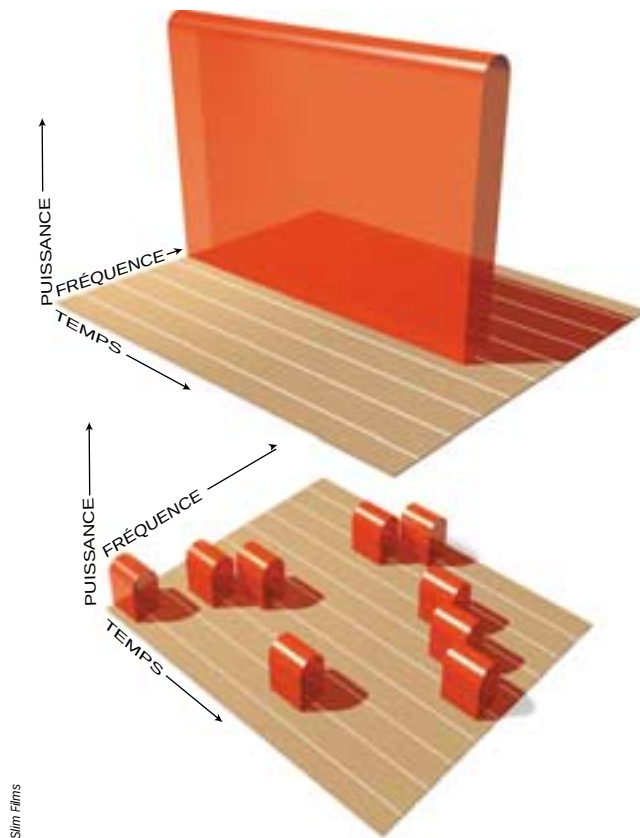
Kobal Collection

des besoins exclusivement commerciaux, les gouvernements ont donné des autorisations à des sociétés qui fournissaient de la téléphonie cellulaire et des services de communications personnelles. Ces sociétés font payer leurs services aux consommateurs, de la même manière que les compagnies téléphoniques facturent leurs abonnés. Avec le nouveau système, les particuliers n'ont plus besoin d'intermédiaires, et ils peuvent communiquer directement et gratuitement, même lorsqu'ils se trouvent à des kilomètres de distance et que des myriades d'utilisateurs utilisent les mêmes canaux radio. Les gouvernements revoient les réglementations et libèrent certaines bandes de fréquences que le public peut utiliser sans autorisation préalable.

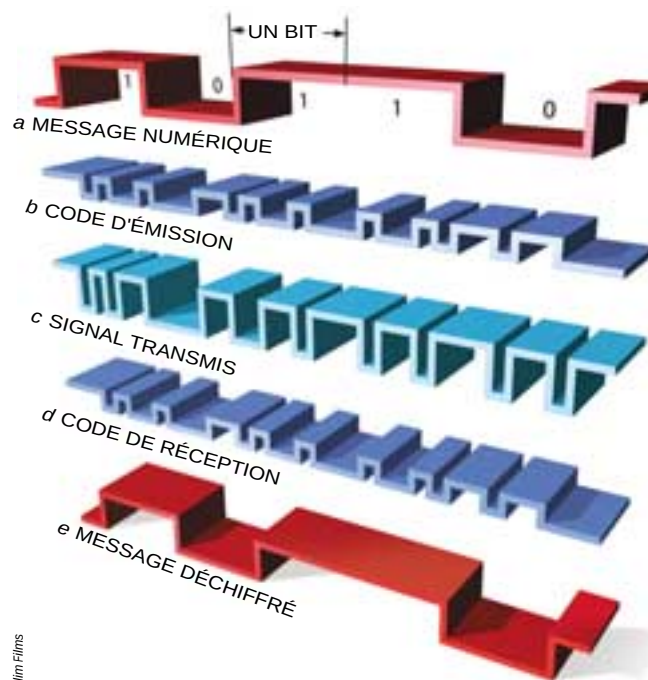
Assez de spectre pour tous

Quel est le fondement de cette révolution technique ? Les communications radio classiques sont fondées sur une diffusion de l'information à forte puissance, sur une seule bande étroite : en utilisant une bande aussi mince que possible, un émetteur laisse à d'autres émetteurs la possibilité d'émettre sans interférences, dans les bandes de fréquences voisines. Toutefois les ingénieurs savent qu'il est plus efficace de faire l'inverse, c'est-à-dire de transmettre les données à faible puissance et en étalant l'information sur une bonne partie du spectre.

Le concept n'est pas intuitif : on ne cherche plus à découper un gâteau en un nombre fini de parts, mais à partager le gâteau en un nombre quasi illimité de petits morceaux à peine perceptibles. Si les radios à bande étalée utilisent plus de bande passante que nécessaire, ces procédés évitent les



1. LES SIGNAUX RADIO (en rouge) ont, pendant longtemps, été transmis de façon continue, à forte puissance, dans une bande de fréquence étroite (en haut). Les ingénieurs savent aujourd'hui qu'on utilise plus efficacement le spectre radio si l'on répartit le signal entre différents canaux, à faible puissance. Une des nouvelles techniques utilisées est le saut de fréquence (en bas).



2. LA SÉQUENCE DIRECTE est une autre technique de répartition d'un signal de basse puissance sur le spectre radio. Ici on mélange le message binaire 10110 (a) avec une séquence codée (b). On transmet ensuite le signal résultant (c). Cette redondance augmente la possibilité de réception sans erreur même dans les zones urbaines où l'espace radio est encombré. Les récepteurs utilisent une séquence codée identique à celle de l'émission (d) pour déchiffrer la transmission et récupérer le message original (e).

interférences, parce que les puissances de transmission sont faibles : chaque fréquence ne transmet que des bouffées de données. Mieux encore, le signal émis est si faible qu'il est à peine perceptible au-dessus du bruit ambiant. Cette caractéristique est un atout supplémentaire, parce qu'il évite les écoutes indiscrettes : en pratique, seul le récepteur habilité peut savoir qu'il y a une transmission.

Initialement l'étalement de spectre a intéressé pour sa discrétion : pendant la Seconde Guerre mondiale, les militaires ont cherché à utiliser le curieux dispositif coproduit par Hedy Lamarr, qui devait devenir une des vedettes du cinéma américain après la guerre (voir l'encadré de la page 72). L'idée était simple : plutôt que de diffuser l'information sur un canal unique que l'ennemi pouvait découvrir, le système breveté proposait de changer de canal en permanence, selon un code secret, connu seulement de l'émetteur et du destinataire. En raison de ces sauts continus de fréquences, un ennemi aurait très difficilement extrait le signal du bruit ambiant. Bien qu'intéressant le système était toutefois impraticable, à l'époque.

Les progrès de l'électronique ont finalement permis de reprendre l'idée. Les puces à semi-conducteurs modernes peuvent diffuser des paquets de données numériques sur de nombreux canaux d'une manière qui peut sembler aléatoire. Le récepteur, conçu pour écouter ces signaux dans le même ordre, peut rassembler l'information transmise dans les diverses bandes de fréquences et reconstruire le signal. Lorsque des paquets manquent ou sont bruités, le récepteur peut demander à l'émetteur de réémettre ces paquets, tandis que des techniques de correction

d'erreur augmentent les chances que chaque paquet soit correctement décodé la première fois qu'il est reçu.

La technique de la séquence directe est une autre façon de répartir un message sur le spectre radio : l'information à transmettre est mélangée à un signal codé qui ressemble à un bruit pour tout récepteur qui ne dispose pas du code, et chaque bit de donnée est envoyé simultanément sur plusieurs fréquences. Le récepteur est synchronisé par le même code que l'émetteur.

De nouveaux progrès de la micro-électronique ont récemment permis la réalisation de processeurs numériques qui traitent des données à haut débit tout en consommant peu d'énergie. Avec ces nouveaux équipements, on peut étaler les données par les deux techniques simultanément, de sauts de fréquence et de séquence directe. Ces nouvelles méthodes évitent mieux les encombrements du spectre, et les transmissions sont moins perturbées par les bruits ou par les échos (contre les immeubles, le sol et différentes couches atmosphériques).

En 1985, la Commission américaine des communications a décidé de libérer l'usage par le public de bandes de fréquences radio pour des communications à étalement de spectre. La décision restait toutefois assortie de contraintes sévères : les émissions devaient être déclarées à la Commission, s'effectuer dans des bandes réservées aux matériels industriels scientifiques et médicaux, leur puissance devait être inférieure à un watt, et l'étalement devait être limité à quelques canaux.

Malgré ces contraintes, les fabricants ont produit et vendu un nombre considérable d'équipements ; l'effet de masse n'a pas encore pleinement joué, de sorte que les matériels réalisés par environ 60 fabricants ne sont abordables qu'aux entreprises : une ligne radio qui transmet dix mégabits par seconde jusqu'à 40 kilomètres de distance, pour des applications informatiques haut débit, coûte environ 60 000 francs. Des matériels moins performants, qui transmettent 1,5 mégabit par seconde sur 25 kilomètres, coûtent 7 500 francs. À plus courte portée (par exemple, dans un bâtiment), des cartes de réseau local radio pour micro-ordinateurs sont vendues 1 200 francs seulement.

Les prix baisseront beaucoup quand les volumes de production

augmenteront grâce à la demande croissante de connexions large bande et sécurisées des ordinateurs vers le réseau Internet. Bientôt, les usagers utiliseront en permanence les transmissions radio pour communiquer avec un système central qui, lui, sera connecté par câble au réseau classique. Nous prévoyons que les systèmes de communication numériques sans fil, fiables et sécurisés, débitant 1,5 mégabit par seconde ou plus sur des distances atteignant plus de 30 kilomètres, coûteront moins de 2 500 francs.

Quels seront les futurs progrès ? Les émetteurs et les récepteurs devenant totalement numériques, le développement de la transmission radio cellulaire permettra des services variés : nous préparons la mise au point de réseaux composés d'émetteurs-récepteurs «intelligents» qui, par exemple, sauront quelle technique d'étalement de spectre utiliser dans une situation donnée pour que l'information soit transmise sans erreur. Progressivement on mélangera les réseaux radio et les réseaux câblés, pour une transmission optimale des informations.

L'analyse du fonctionnement du réseau Internet montre bien comment pourrait se faire la régulation du nouvel environnement radio. Pour faire fonctionner une structure décentralisée similaire, qui partagerait le spectre radio de façon optimale, les experts en communication, les entreprises et les organismes de réglementation du monde entier devraient s'unir. Le réseau devra sans doute être animé par des systèmes électroniques «intelligents», qui exécuteront des protocoles autorégulés. Lors de la création du réseau, on devra incorporer à l'infrastructure des règles qui conduiront à un partage efficace de la ressource commune qu'est le spectre radio.

David HUGHES et Dewayne HENDRICKS ont mis au point le système radio d'Ulaanbaatar.

M.K. SIMON, J.K. OMURA, R.A. SCHOLTZ et B.K. LEVITT, *Spread Spectrum Communications Handbook*, McGraw-Hill, 1994.

Tim J. SHEPARD, *A Channel Access Scheme for Large Dense Packet Radio Networks*, in *Proceedings of ACM SIGCOMM '96*, ACM, 1996.
