

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

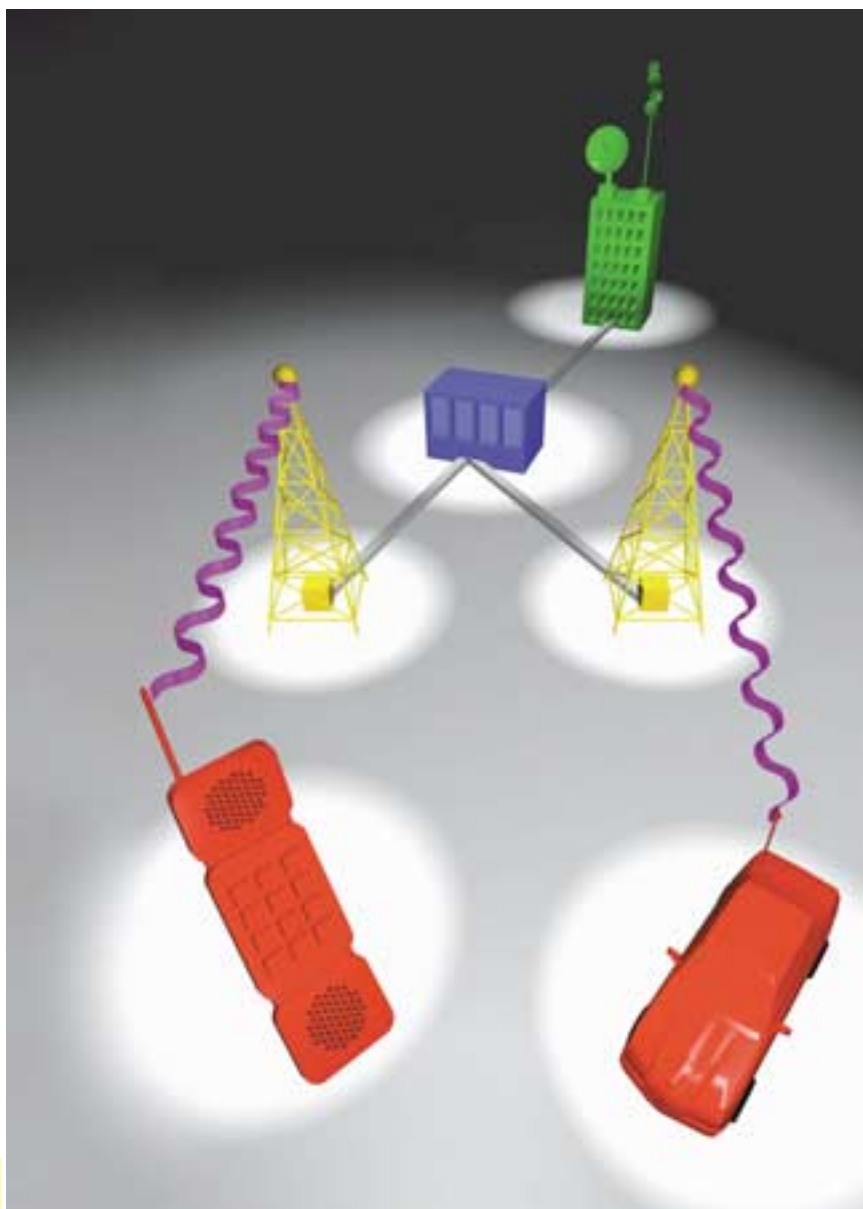
les fonctions de radiotéléphone, de terminal Internet, de télécopieur, de récepteur de radiomessagerie et d'agenda, a été commercialisé en 1996.

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.

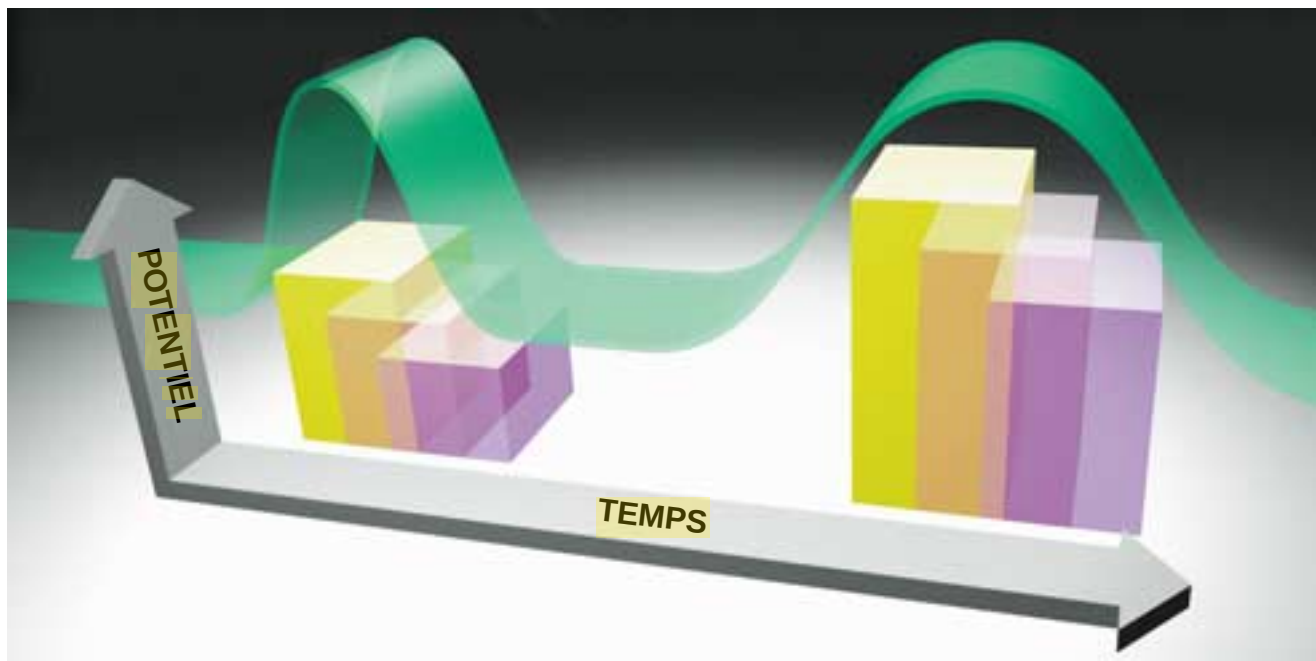
Techniquement, la transmission radio de données est au point : nous la testons à l'Université Carnegie Mellon, avec un prototype de réseau local, qui couvre la moitié du campus et qui est relié à un réseau commercial, plus lent, qui s'étend sur la zone urbaine de Pittsburgh. Les utilisateurs se déplacent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



Slim Films

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.

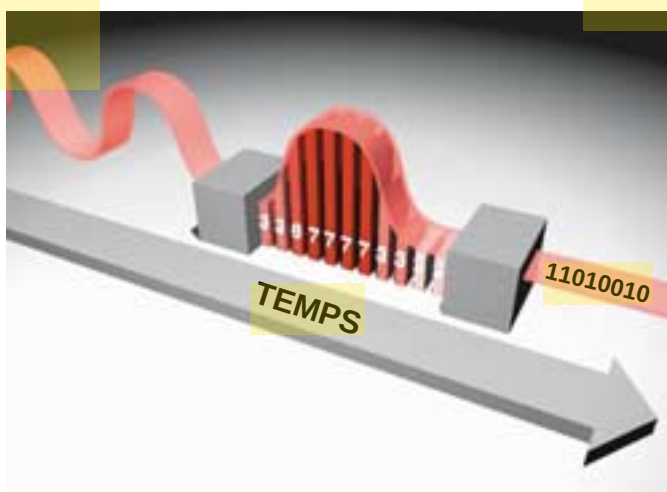
Des bits de correction d'erreur

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

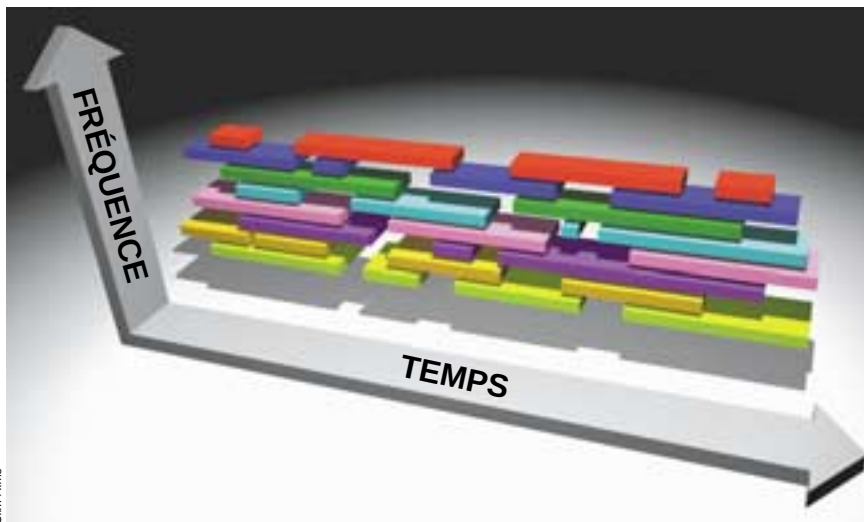
L'autre grande difficulté dans la mise au point de réseaux par radio est la répartition du petit nombre de fréquences radio disponibles entre le maximum d'utilisateurs. Beaucoup de ces réseaux reposent sur le principe de la réutilisation des fréquences : les canaux radio disponibles sont répartis en 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.

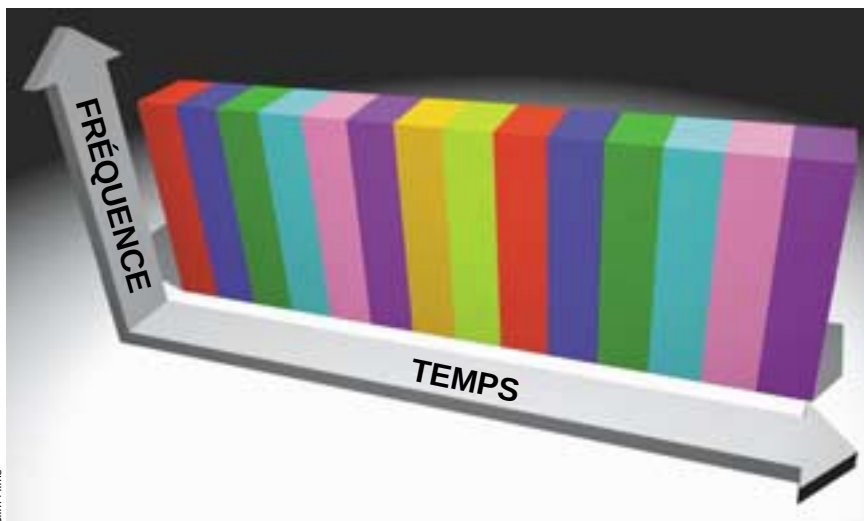
Les stations de base utilisent diverses méthodes pour séparer les signaux provenant de différents émetteurs. La plus simple et la plus utilisée est celle de l'accès multiple par répartition de fréquence : une fréquence particulière est attribuée à chaque appareil mobile (voir la figure 5). La station 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.