

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 les trajets multiples sont ainsi éliminés, et le récepteur peut reconstruire les données initiales avec une grande sûreté.

Le partage des fréquences

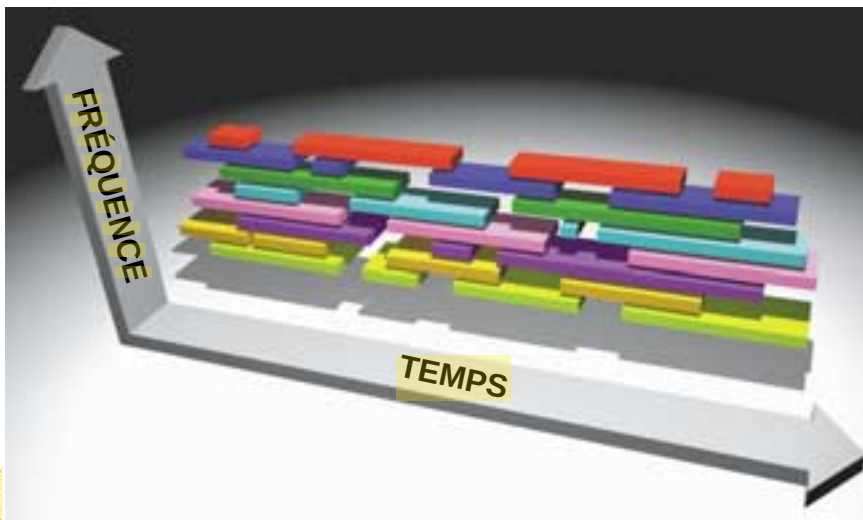
L'autre grande difficulté dans la mise au point de réseaux par radio est la répartition du petit nombre de fréquences radio disponibles entre le maximum d'utilisateurs. Beaucoup de ces réseaux reposent sur le principe de la réutilisation des fréquences : les canaux radio disponibles sont répartis en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

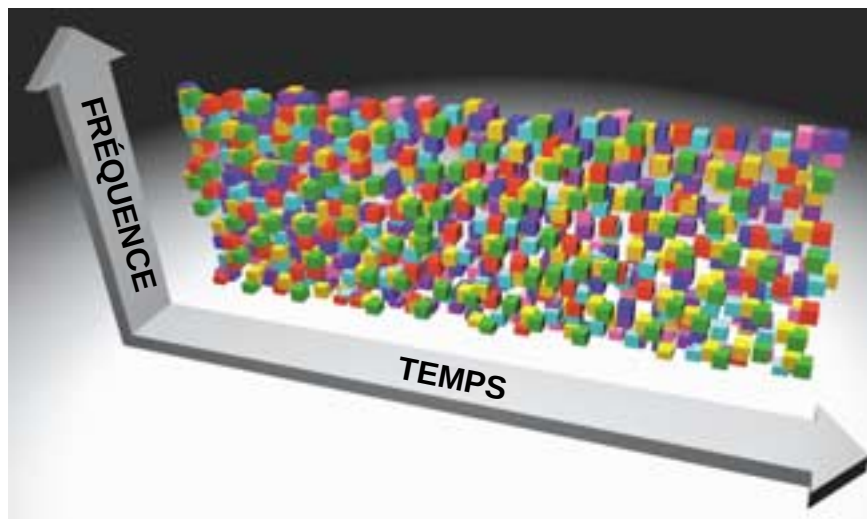
Des réseaux compatibles

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.
