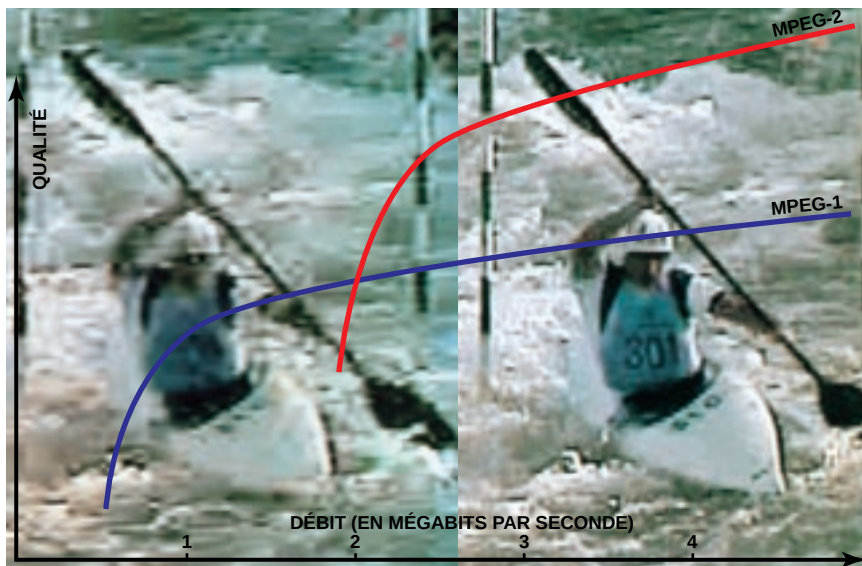




2. LES CODAGES MPEG1 ET MPEG2 ont été mis au point pour transmettre des images animées avec des qualités différentes : le standard de compression MPEG1 vise la transmission des images de qualité moyenne à très bas débit. Au-delà de deux mégabits par seconde, le standard MPEG2 prend le relais. Au prix d'un débit élevé, la qualité d'image est alors améliorée, mais cette dernière dépend aussi de la nature de l'image : les séquences de sport sont plus difficiles à coder que les films. À gauche, l'image du kayak est codée à huit mégabits par seconde, tandis que la même image (à droite), codée à seulement deux mégabits par seconde, est plus grossière.

plupart des applications sonores pour le grand public, comme la radiodiffusion numérique sonore DAB (*digital audio broadcast*, soit «diffusion radio numérique»). La norme MPEG2 a étendu le codage MPEG1 aux sons à plusieurs canaux, tout en préservant la compatibilité : un son codé en MPEG2 sur cinq canaux, en «pentaphonie», peut être restitué en stéréophonie par des décodeurs MPEG1, et, inversement, les sons codés en MPEG1 sont interprétables par les décodeurs MPEG2. À l'avenir, les cinq canaux de la norme MPEG-audio pourront être utilisés, en particulier pour inclure des effets sonores comme l'effet «spatial» utilisé dans les salles de cinéma, où le spectateur est entouré de sons.

Comment choisir le débit des données vidéo et des données sonores pour satisfaire le téléspectateur ? En demandant à des groupes de personnes de comparer des séquences audio ou vidéo non comprimées à ces mêmes séquences comprimées à différents degrés. Ces testeurs, composés de spécialistes pour le son et de personnes ordinaires pour l'image, notent la qualité du son ou de l'image sur une échelle dont les extrêmes correspondent à «franchement gênante» et «non perceptible».

Au Centre commun d'études de télédiffusion et télécommunications (CCETT), à Rennes, nous avons amélioré ces méthodes : au lieu tester de courtes

séquences notées une à une, les jurys disposent d'un curseur allant de «bon» à «mauvais» qu'ils actionnent pendant toute la durée du test. Les séquences tests sont ainsi plus longues et plus réalistes. Connaissant la relation quantitative entre la compression et la qualité perçue, les diffuseurs ont les outils pour choisir le compromis entre le coût et la satisfaction du consommateur (plus on comprime, plus on économise de la bande passante et moins onéreuse est la diffusion).

Transmission multiple

Une fois les images et les sons convenablement comprimés, les diffuseurs se chargent de la transmission aux téléspectateurs. Si la plupart des Français reçoivent aujourd'hui la télévision par une antenne «râteau» installée sur leur toit, la transmission par câble et par satellite se développe. Quelles techniques permettent d'émettre plusieurs millions de bits par seconde vers tous les téléspectateurs ?

Qu'elle soit analogique ou numérique, la transmission des signaux utilise des ondes électromagnétiques dont on fait varier dans le temps l'amplitude et la phase, en fonction du signal à transmettre : c'est la modulation.

Lorsque la modulation est analogique, comme c'est le cas avec le codage SECAM aujourd'hui, l'amplitude et la

phase de l'onde modulée varient continuellement. En transmission numérique, en revanche, la suite binaire (de 0 et de 1) qui code les images, les sons, etc. est découpée en séquences successives de p bits (en général 2, 3, 4, 5 ou 6). Il existe 2^p séquences de p bits différentes. Par exemple, les séquences de deux bits sont au nombre de quatre : 00, 01, 10 et 11. À chaque séquence de p bits, on fait correspondre un couple phase/amplitude parmi 2^p valeurs. Sur un oscilloscope, les 2^p valeurs possibles du couple dessinent une «constellation» de points (voir la figure 4). Toutes les T secondes, on émet une onde de phase et d'amplitude données, ce qui correspond à un point de la constellation. La succession des valeurs de ces points contient les données transmises. Plus la période T est faible, plus grand est le débit transmis, mais plus grande est aussi la bande passante nécessaire pour acheminer le signal (on peut montrer que la bande passante est légèrement supérieure à $1/T$).

Les canaux de transmission par satellite bénéficient d'une bande passante relativement confortable, de l'ordre de 36 mégahertz. La principale contrainte technique vient des restrictions de la puissance disponible : à 36 000 kilomètres d'altitude, le satellite ne dispose que de l'énergie produite par ses panneaux solaires, dont la taille est limitée par le coût et par des contraintes techniques. La modulation choisie n'autorise que quatre valeurs du couple amplitude/phase. Toutes les 36 nanosecondes, on transmet ainsi deux bits différents ($4 = 2^2$). Nous verrons que ce choix d'une modulation à deux bits résulte des atténuations du signal lors de la propagation entre le satellite et le sol. Le débit résultant est de l'ordre de 55 mégabits par seconde, ce qui correspond à un débit utile, après correction des erreurs de transmission, de 38 mégabits par seconde.

Les contraintes techniques des réseaux câblés sont inverses : les fréquences disponibles sont rares (il est coûteux d'enterrer des câbles), et les canaux sont limités à huit mégahertz de largeur ; en revanche, la puissance disponible est assez confortable. Pour pallier le manque de bande passante, on adopte une constellation à 64 valeurs : toutes les 145 nanosecondes, on obtient une série de six bits ($64 = 2^6$). On transmet plus de bits par intervalle de temps, car l'atténuation est plus faible que pour un satellite. Le débit

atteint est d'environ 41 mégabits par seconde, ce qui correspond encore, après correction des erreurs, à un débit utile de 38 mégabits par seconde (les débits sont volontairement identiques sur câble et sur satellite pour que le câble puisse transmettre facilement les mêmes données numériques).

Lors de la transmission, les récepteurs captent un signal très atténué qui est amplifié. Plus le signal est amplifié, plus il est altéré. L'introduction de ce bruit dégrade inévitablement toutes les transmissions : c'est lui qui ajoute cette «neige» caractéristique aux images analogiques de la télévision. Lorsque les signaux sont numériques, les points qui représentent le signal dans la constellation deviennent des taches. Dès que le bruit est trop important, les taches se chevauchent, et il devient plus difficile pour le récepteur de décider à coup sûr quel point de la constellation avait été émis. Lorsque la constellation est plus dense, par exemple la constellation à 64 états de la transmission par câble, les points sont plus proches et le chevauchement fréquent engendre des erreurs de transmission. C'est pourquoi, dans les transmissions par satellite où le bruit est important, on a préféré une constellation à quatre états seulement (voir la figure 4).

Pour lutter contre les erreurs de transmission, on doit réduire leur fréquence d'apparition à une erreur pour un milliard de bits transmis, ce qui correspond à quelques erreurs par heure seulement. De puissants mécanismes de correction d'erreurs ont été mis en œuvre à cette

fin : on ajoute des informations supplémentaires aux bits à transmettre, afin qu'un bit mal reçu puisse être «deviné» par un décodeur adéquat.

Le principe de cette correction s'explique simplement sur des messages composés de lettres. Supposons que nous voulions transmettre un message composé de la suite de voyelles : AEIOEAEUEIUEIO. Avec beaucoup de chance, ce message peut parvenir à son destinataire intact, mais, souvent, les défauts de transmission le transformeront en quelque chose comme AEIOEOEIEUEIO, avec deux erreurs en sixième et en huitième position. On donne au destinataire un moyen de détecter les erreurs en y insérant des consonnes, de façon à créer des mots intelligibles. Par exemple, la suite précédente de voyelles se retrouve intégralement dans le message plus long suivant : ATTENTION MESSAGE NUMERIQUE IMPORTANT. Perturbé lors de la transmission, ce message parviendrait par exemple à son destinataire sous la forme ATTELITION MESSOGE NOMERIQUE IMPORTANT, où les voyelles de rangs 6 et 8 sont encore erronées. Toutefois, le destinataire rectifie alors facilement MESSOGE, qui n'existe pas, en le mot voisin MESSAGE, et NOMERIQUE en NUMERIQUE. Après élimination des consonnes, il récupère la suite des voyelles intacte.

La remarquable fiabilité des lecteurs optiques de codes à barres, utilisés par exemple aux caisses de supermarchés, est due à la puissance de ces méthodes de correction d'erreur. Les lecteurs de disques compacts recourent aussi à de

telles techniques de codage pour éviter les erreurs de lecture. Aujourd'hui, ces codes, inventés à l'Institut de technologie du Massachusetts par Irving Reed et Gustave Solomon en 1960, trouvent une nouvelle application dans la transmission de la télévision numérique par les réseaux câblés. Pour la transmission par satellite, intrinsèquement moins fiable, le code choisi pour le câble a été conservé, mais il est renforcé par un deuxième niveau de correction. Enfin, un troisième niveau de correction a même été adjoint pour fiabiliser les liaisons hertziennes terrestres, encore moins fiables.

La transmission hertzienne terrestre cumule en effet les difficultés techniques. D'une part, les fréquences disponibles sont rares, car la majorité d'entre elles sont déjà utilisées pour la télévision analogique. D'autre part, les puissances d'émission sont limitées, en raison du risque de brouillage possible des chaînes de télévision existantes. Enfin, les transmissions terrestres sont perturbées par la réflexion parasite des ondes électromagnétiques sur les collines ou sur les constructions qui entourent l'antenne du récepteur. Les échos sont décalés dans le temps, parce que la lumière se propage à vitesse finie. Les décalages de quelques microsecondes entre l'instant d'arrivée du signal principal et les instants d'arrivée des signaux parasites engendrent les images fantômes que l'on voit parfois sur les téléviseurs analogiques (voir la figure 5).

Pour fiabiliser les transmissions, la télévision numérique terrestre utilisera



3. LA COMPRESSION DES IMAGES ANIMÉES par le codage MPEG2. Les images *I*, qui reviennent périodiquement, sont codées sans référence aux autres images. Les images *P* sont prédites à partir d'une image

précédente : on transmet une image fictive qui code la différence entre l'image *P* et l'image *I*. Les images *B* sont reconstruites à partir de la moyenne des deux images *I* ou *P* les plus proches.

une technique de transmission multiporteuse mise au point au CCETT : l'unique onde électromagnétique porteuse est remplacée par plusieurs milliers d'ondes porteuses, portées par des fréquences proches, simultanément transmises. Dans cette transmission parallèle de plusieurs milliers d'ondes porteuses, chaque porteuse transporte moins d'un millième du débit total et peut donc être modulée 1 000 fois plus lentement que si elle était seule. La durée pendant laquelle on transmet un point de la constellation étant égale à quelques centaines de microsecondes au lieu de quelques centaines de nanosecondes pour la modulation monoporteuse classique, on élimine les interférences entre deux émissions successives en les espaçant d'une courte durée destinée à absorber les échos.

Cette transmission multiporteuse résout un autre problème de la diffu-

sion hertzienne terrestre. La portée d'un émetteur de télévision est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. Lorsqu'une antenne de réception capte les signaux de deux émetteurs, elle reçoit d'abord le signal émis par l'émetteur le plus proche, et un peu après, le signal émis par l'émetteur le plus éloigné. Ce second signal est identique au premier, mais décalé dans le temps, si bien qu'il est équivalent à un écho du premier signal. Pour éviter que deux émetteurs ne se brouillent mutuellement, on fait émettre les émetteurs voisins à des fréquences porteuses différentes (c'est également le cas pour la transmission radio analogique : lorsqu'on change de région, la fréquence des stations FM change). Les fréquences, si précieuses, sont ainsi gaspillées.

Comme la transmission multiporteuse est peu sensible aux échos, deux émetteurs voisins fonctionnant sur la

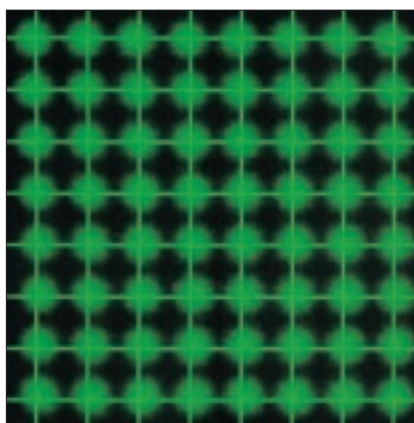
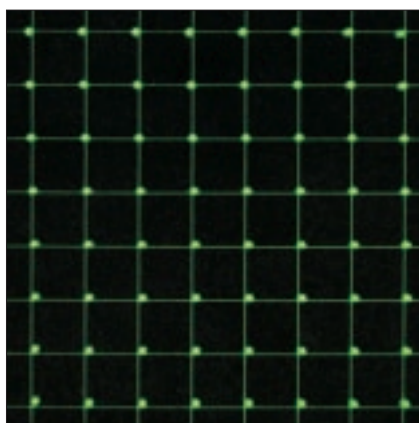
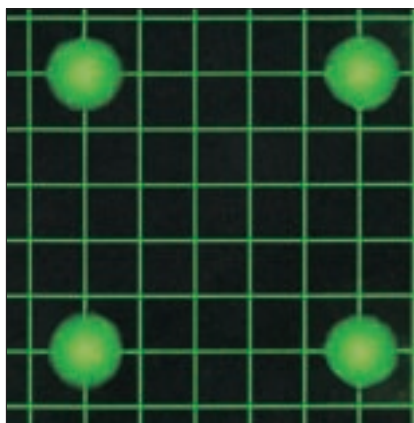
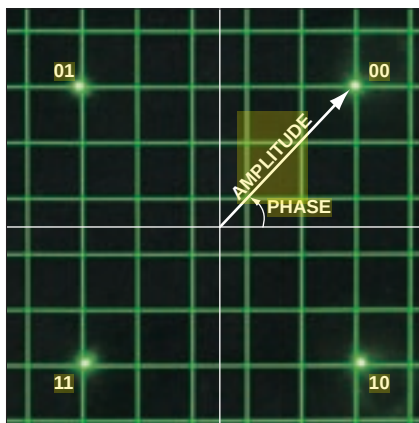
même fréquence ne se brouillent plus. Un grand territoire peut être couvert avec autant d'émetteurs que nécessaire, tous fonctionnant sur la même fréquence. On gagne ainsi un facteur dix dans l'utilisation de la bande passante. La modulation multiporteuse résiste également aux brouillages involontaires dus à une télévision analogique qui émettrait à proximité : si quelques porteuses numériques sont brouillées, la proportion de l'information perdue reste assez faible pour que le système correcteur d'erreurs la recouvre intégralement.

Malgré ces efforts, chaque canal de télévision terrestre, avec une largeur de 8 mégahertz, ne peut acheminer qu'un débit maximum de 35 mégabits par seconde, ce qui correspond, après correction des erreurs de transmission, à un débit utile de 25 mégabits par seconde. Ce débit reste bien inférieur aux 38 mégabits par seconde du câble ou du satellite : on transmet moins de programmes sur un canal de télévision terrestre que sur un canal du câble ou du satellite. En revanche, contrairement aux téléviseurs qui reçoivent les programmes par câble ou par satellite, les récepteurs terrestres seront librement déplacés tels les téléphones sans fil. On expérimente même des récepteurs à écran plat, alimentés par batterie, et installés à l'arrière des voitures ou dans les transports en commun.

Tous dans le tuyau

Que ce soit par satellite, par câble ou par diffusion terrestre, les canaux de transmission numérique ont conservé leur largeur en fréquence des temps analogiques. Or, grâce à la compression, la place nécessaire à un programme numérique de qualité identique à celle des programmes analogiques a diminué. La quarantaine de mégabits par seconde d'un canal de satellite ou d'un canal de réseau câblé est partagée entre plusieurs programmes. Ce nombre est compris entre deux et vingt selon que l'on y place des programmes en haute définition ou des programmes de qualité réduite (comme les émissions de téléachat).

Les suites de bits sont regroupées en paquets de plusieurs sortes : des paquets vidéo, audio, de sous-titres, de télétexte, de messages de contrôle d'accès, etc. Ces paquets ne sont pas tous indépendants et l'on doit conserver la synchronisation entre le son et l'image. Avant la transmission, les paquets des



4. LES DONNÉES NUMÉRIQUES qui sont transmises par les diffuseurs sont décomposées en séquences que l'on peut représenter par des points dans un quadrillage. À intervalles de temps réguliers, on module l'amplitude et la phase d'une onde porteuse afin de coder l'un des points de cette « constellation ». Pour la transmission par satellite, la constellation est composée de quatre points (en haut, à gauche). Les données sont ainsi transmises par séquences de deux bits. Sur le câble, on transmet un point parmi 64 (en bas, à gauche) à chaque période, soit six bits ($2^6=64$). Le parcours du signal sur de grandes distances introduit du bruit : le signal reçu (à droite) n'est pas constitué de points, mais de taches, qui, lorsqu'elles se recouvrent introduisent des erreurs dans la transmission. Ainsi, pour les satellites, on choisit une constellation à quatre états : les points sont éloignés et se recouvrent moins facilement que dans la constellation à 64 états.