

électroluminescentes sont robustes, possèdent de grands angles de vue et une longue durée de vie. S'ils demeurent chers, petits et monochromes, ils se sont néanmoins imposés pour plusieurs applications.



Doug Peck, PixTech

Les écrans à émission de champ. Il y a 20 ans, des chercheurs de l'Université Stanford ont montré que de faibles tensions électriques appliquées à des pointes de molybdène ou d'autres métaux réfractaires créent des champs électriques suffisamment intenses pour extraire des électrons du métal à la température ambiante. Cette émission électronique «de cathode froide» est aujourd'hui le fondement d'un dispositif de visualisation sans tube qui utilise plusieurs cathodes par pixel.

À l'époque où l'émission de pointe fut découverte, on ignorait comment réaliser industriellement ces cathodes. Les progrès de la micro-électronique et de la physique des matériaux ont résolu le problème. La Société française *PixTech* commercialise les premiers écrans à émission de champ ; des sociétés américaines la suivent.

La Société *Canon* vient d'annoncer un autre type de cathode, qui faciliterait la fabrication de ces écrans. On évite de sculpter des pointes microscopiques sur du silicium monocristallin en créant une mince bande isolante entre deux zones métalliques (qui servent d'électrodes) déposées sur du verre. Si ce dispositif fonctionne comme prévu, des cathodes de n'importe quelle taille pourraient être réalisées par des systèmes bon marché analogues aux imprimantes à jets d'encre.

Si de nombreux problèmes demeurent, les écrans à émission de champ sont de sérieux concurrents des écrans à cristaux liquides, pour les écrans de petites dimensions. Pour ce qui concerne les grandes dimensions, ce seront peut-être même des concurrents des écrans à plasma.



Rohde Corporation

Les écrans fluorescents. Ces écrans, qui s'inspirent d'une idée ancienne, sont des sortes de tubes cathodiques plats fonctionnant à basse tension. Les électrons émis par des filaments cathodiques froids sont dirigés vers des atomes qui émettent de la lumière avec un bon rendement malgré la basse tension. Les pixels peuvent être sélectionnés et allumés par un réseau de grilles métalliques situées entre les cathodes et les phosphores. Ces dispositifs fluorescents sous vide sont souvent utilisés pour les horloges de voitures, dans les affichages de fours et, aussi, pour les magnétoscopes. Par cette technique, les ingénieurs n'ont, pour l'instant, réalisé que de petits affichages.

elles sont soutenues par des entreprises qui disposent de fonds importants et qui jouissent d'un soutien d'État.

Les entreprises japonaises bénéficient aujourd'hui de leur volonté et des investissements effectués depuis 30 ans. Elles doivent aussi beaucoup à l'inventivité de leurs ingénieurs et de leurs ouvriers, qui ont assidûment perfectionné les techniques de production. Pour ces raisons, les usines d'écrans de visualisation sont pour la plupart en Asie.

L'amélioration de ces écrans est un travail motivant, source d'idées novatrices. De nouvelles techniques apparaissent, alors même que les anciennes s'améliorent. Ces écrans, qu'ils soient à plasma ou issus d'une autre technique, sont des éléments primordiaux de l'interaction entre les humains et les machines de demain.

Alan SOBEL, consultant à Evanston (Illinois), travaille depuis 35 ans dans le domaine de l'affichage électronique.

Flat-Panel Displays and CRTs, sous la direction de Lawrence E. Tannas, Jr., Van Nostrand Reinhold, 1985.

Electro-optical Displays, sous la direction de M. Karim, Marcel Dekker, 1992.

T. MAKINO et al., *Improvement of Video Image Quality in AC-Plasma Display Panels by Suppressing the Unfavorable Coloration Effects with Sufficient Gray Shades Capability*, in *Asia Display*, 1995.

Display Systems: Design and Applications, sous la direction de Lindsay W. MacDonald et Anthony C. Lowes, Wiley SID series in display technology, published in association with the Society for Information Display, John Wiley & Sons, 1997.

Display Systems: Design and Applications, sous la direction d'A. Lowe, John Wiley & Sons, 1997.

La norme européenne de télévision numérique

JEAN-PIERRE HÉNOT • VINCENT MICHON • BERTRAND SUEUR

La nouvelle norme européenne de télévision numérique remplacera bientôt la norme de transmission analogique dans tous les équipements télévisuels.

Depuis 20 ans, le monde de la télévision prépare son évolution vers les systèmes numériques, où les sons et les images sont codés par des nombres au lieu d'être transmis sous forme de signaux continus. Dans les années 1980, les effets spéciaux numériques se multiplient. Aujourd'hui, la numérisation s'est imposée dans l'ensemble du monde audiovisuel : elle déborde du studio professionnel et envahit tous les maillons de la chaîne de l'image, des caméras aux téléviseurs, en passant par les satellites ou les réseaux câblés.

Cet avènement du numérique est facilité par l'adoption d'une norme européenne issue des travaux du groupe DVB (*digital video broadcast*, soit «diffusion vidéo numérique»). Ainsi, les grandes sociétés d'informatique, de télécommunication et d'audiovisuel multiplient les produits entièrement numériques. L'utilisateur bénéficiera de programmes de télévision plus nombreux. Pour les professionnels de l'audiovisuel, la numérisation diminue le coût de diffusion des programmes.

Pourquoi la numérisation des images nécessite-t-elle une compression des données et comment cette compression est-elle faite ? Une fois numérisée, l'image est transmise aux téléspectateurs par des satellites, par des câbles ou par voie hertzienne terrestre. Quels sont les avantages et les inconvénients de ces modes de transmission ? Enfin, quelle que soit la méthode choisie, la transmission numérique nécessite des «codes correcteurs d'erreur», recettes mathématiques qui permettent de retrouver le message original, même lorsque celui-ci a été en partie altéré. Comment ces codes fonctionnent-ils et comment

mélange-t-on plusieurs flots de données dans un flot plus important, ce qu'on nomme le multiplexage ? L'examen de ces questions montrera combien le traitement numérique des sons et des images est supérieur à l'ancien système analogique de diffusion.

Nous verrons aussi comment la numérisation permet de crypter l'information pour contrôler l'accès aux programmes de télévision payants. Aujourd'hui, près d'une centaine de chaînes numériques sont diffusées par satellite ou par le câble. La qualité encore imparfaite de ces transmissions devrait être améliorée par l'augmentation des débits : la télévision en haute définition pourra alors s'imposer.

Réduire les débits

La norme numérique professionnelle d'échantillonnage des images se fonde sur les caractéristiques de la télévision analogique, qui affiche 25 images par seconde, avec 625 lignes par image, dont 576 sont effectivement visibles à l'écran (les autres lignes transmettent des informations complémentaires, comme le télétexte). Chaque ligne est composée de 720 points, codés par un nombre à 16 chiffres binaires (16 bits). Ainsi, la transmission des images numérisées nécessite un débit d'information égal à 165 mégabits par seconde.

Ce débit considérable est nécessaire dans les studios professionnels qui doivent manipuler les images et garantir des enregistrements parfaits, même après de multiples copies, mais il est excessif pour des utilisations domestiques : la capacité des canaux de transmission ou le débit des magnétoscopes grand public sont 10 à 40 fois inférieurs.

Grâce aux techniques de compression numérique, on diminue le débit au prix d'une dégradation maîtrisée de la qualité des images et des sons. Cette compression résulte de deux opérations principales : d'une part, on évite de transmettre la totalité de chaque image fixe ; d'autre part, on utilise les redondances entre images, de sorte que, dans la transmission d'une succession d'images, on ne transmet que les changements entre les images.

Une image fixe, telle la photographie d'un clocher gris sur un ciel bleu, se décompose en plusieurs zones. Un point bleu est le plus souvent entouré d'autres points bleus, tandis que la plupart des points gris sont cernés d'autres points gris. Cette règle s'applique à toute l'image, excepté sur les contours, où le gris de la pierre jouxte le bleu du ciel.

En pratique, pour analyser les détails de l'image, on la décompose en pavés jointifs de huit lignes par huit points. À l'intérieur de ces pavés, on effectue une opération mathématique qui transforme les 64 nombres qui codaient la couleur des 64 points en 64 autres nombres. On choisit cette opération réversible de manière à présenter l'information sur le bloc en fonction de la qualité subjective de l'image : la suite de 64 nombres obtenus est caractéristique de la quantité de détails de l'image, c'est-à-dire du nombre de contours. Chacun des 64 nombres correspond à un niveau de détail. Comment transmettre une image plus grossière que l'image initiale ? En choisissant de transmettre seulement une partie de ces nombres (par exemple les 16 premiers). Puis, dans le récepteur, l'opération mathématique inverse reconstruit l'image initiale, mais moins détaillée.

On affine cette compression des images fixes en utilisant les imperfections du système visuel humain, qui remarque plus facilement une tache sur un pantalon uni que sur un pull-over chiné. Ainsi, on réduit peu la qualité des images si l'on transmet plus grossièrement les zones chinées que les zones unies. La quantité d'informations sur les discontinuités ainsi sacrifiées lors de cette étape détermine le débit de l'image comprimée, et donc, sa qualité.

Dans les séquences animées, l'impression du mouvement résulte de l'affichage d'une nouvelle vue fixe tous les 1/25 de seconde. Or, deux images successives d'une série sont comparables à deux photographies d'une même scène, prises à une fraction de seconde d'intervalle : elles se ressemblent beaucoup. Les systèmes de codage exploitent cette redondance temporelle en distinguant trois types d'images. Premièrement, des images codées intrinsèquement, c'est-à-dire sans référence aux images voisines (images de type *I*, comme *Intra*), sont indispensables pour amorcer le décodage lorsque le téléspectateur change de chaîne ou après un changement de plan, et leur transmission nécessite la moitié du débit total. Deuxièmement, les images codées à partir des ressemblances avec une image précédente (image de type *P*, comme *Prédit*) : on transmet uniquement les différences entre ces images et des images

précédentes ; leur transmission nécessite quatre fois moins de débit que les précédentes. Enfin, pour les images interpolées de type *B*, on transmet les différences entre ces images et la moyenne des deux images *I* et *P* situées de part et d'autre (les images sont remises dans le bon ordre à l'arrivée) ; elles n'occupent que quelques pour-cent du débit total (voir la figure 3).

Ces principes ont été définis par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) qui a publié des algorithmes nommés MPEG1 et MPEG2 vidéo (*Moving Picture Expert Group*, soit «groupe d'experts pour les images animées»). Le premier, prévu pour l'enregistrement de séquences d'images sur disque compact à des débits inférieurs à 1,5 mégabit par seconde, traite des images quatre fois plus petites que les images normales de télévision. La norme MPEG2 étend la norme MPEG1 au format de la télévision classique et peut même être utilisée pour de la télévision en haute définition.

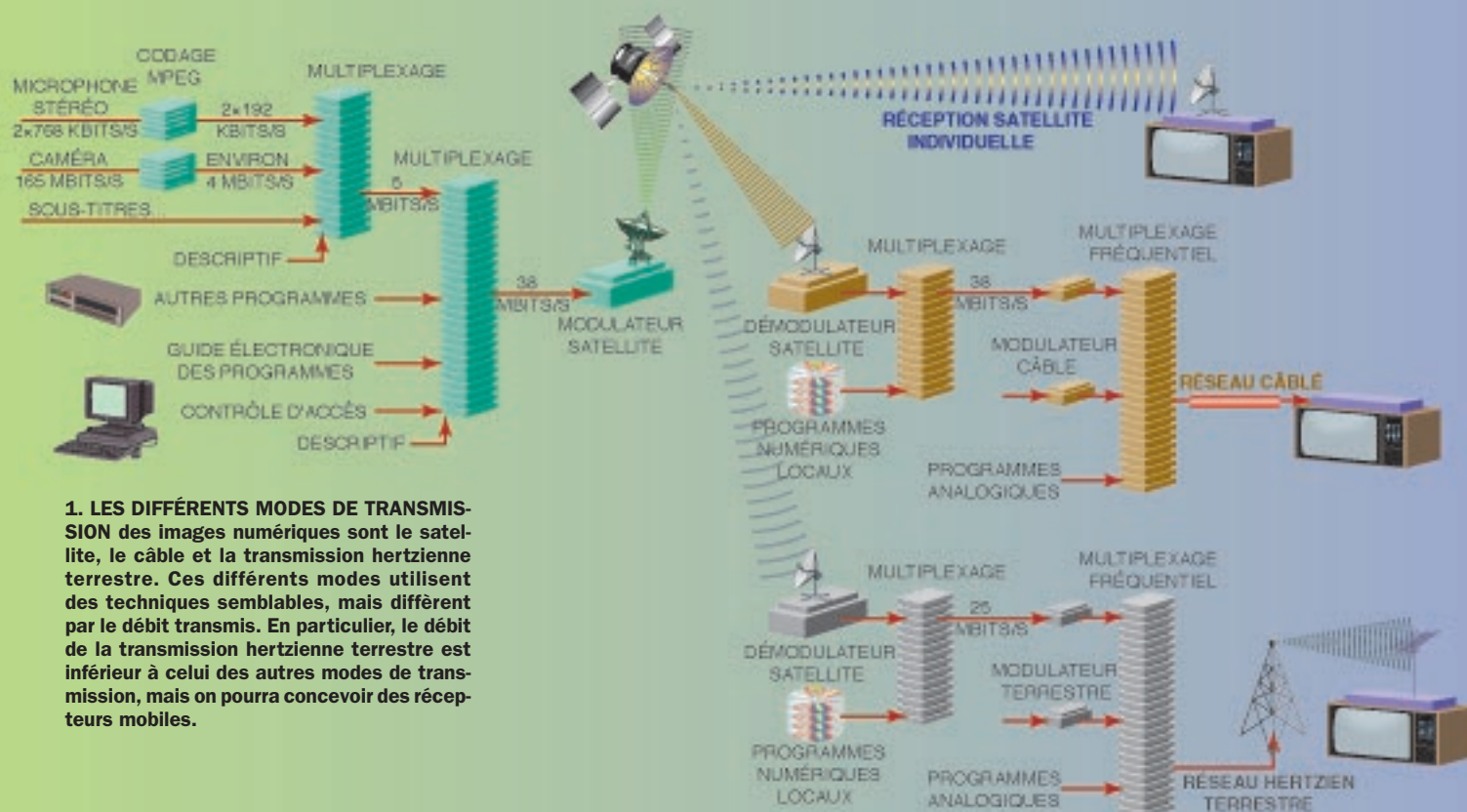
Le son, à l'appui de l'image

La télévision ne se réduit pas aux images : elle s'enrichit grâce au son. La numérisation des bandes sonores qui accompagnent les images vidéo est similaire à celle des images elles-mêmes. Dans la norme MPEG2, les sons sont échantillonnés à 48 kilohertz sur 16 bits

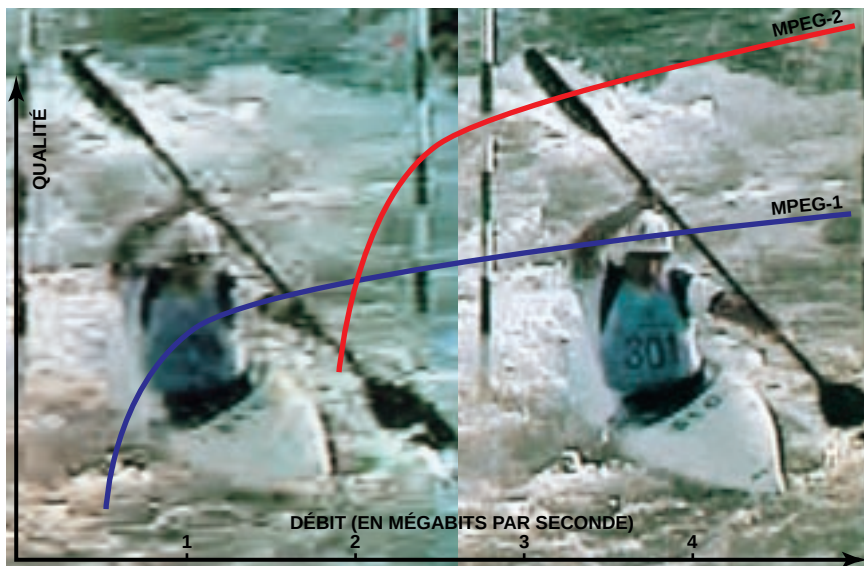
minimum : 48 000 fois par seconde, on code l'intensité du son selon 65 536 niveaux (2^{16}). Le débit occupé par le son est ainsi de 768 kilobits par seconde et, comme la bande passante est une ressource rare, les données audio sont également comprimées.

L'oreille étant le dernier élément de la chaîne de transmission des sons, les ingénieurs utilisent ses imperfections afin de réduire le débit sans dégrader la qualité perçue. On divise par exemple la gamme des fréquences audibles, des plus graves aux plus aiguës, en 32 bandes de fréquences distinctes. Toutes les 8 millisecondes, on mesure l'intensité des 32 bandes. Puis on utilise une particularité du système auditif humain, qui ne perçoit pas un son lorsqu'il est émis en même temps qu'un autre son plus puissant et de fréquence voisine : le démarrage d'un camion couvre le bruit sourd du moteur de la voiture qui le suit. Par exemple, lorsque la bande 25 est si forte que l'on n'entend pas beaucoup la bande 24 ni la bande 23, on transmettra une information minimale pour ces bandes, à condition que cette réduction d'information reste inaudible.

La norme MPEG1 code sans défaut audible un son stéréophonique à un débit de deux fois 256 kilobits par seconde, voire deux fois 192 kilobits par seconde si l'on élimine certaines redondances entre les deux voies. Cette norme est aujourd'hui utilisée pour la



1. LES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSMISSION des images numériques sont le satellite, le câble et la transmission hertzienne terrestre. Ces différents modes utilisent des techniques semblables, mais diffèrent par le débit transmis. En particulier, le débit de la transmission hertzienne terrestre est inférieur à celui des autres modes de transmission, mais on pourra concevoir des récepteurs mobiles.



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 AEIOEOEIEIUEIO, 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 ATTELTION 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 hertziennne 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

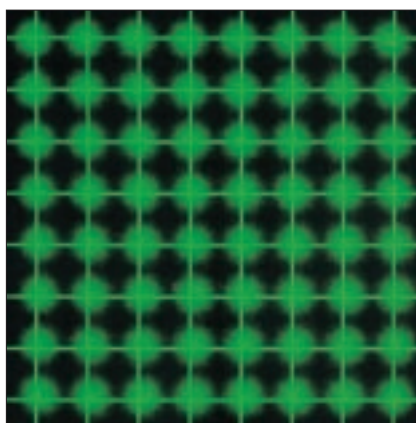
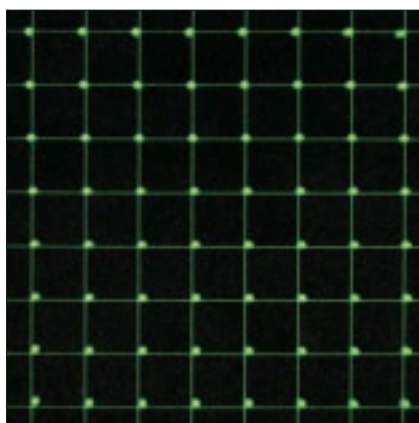
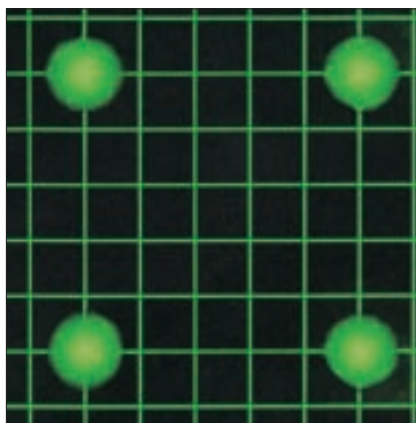
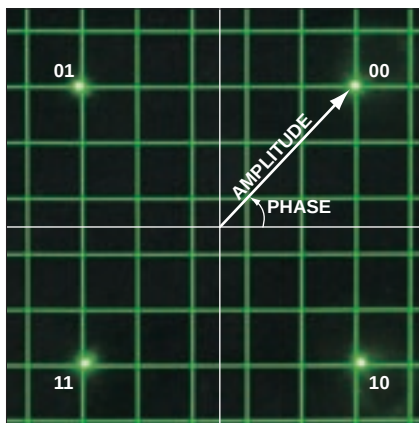
même fréquence ne se brouillent plus. Un grand territoire peut être couvert avec autant d'émetteurs que nécessaire, tous fonctionnant sur la même fréquence. On gagne ainsi un facteur dix dans l'utilisation de la bande passante. La modulation multiporteuse résiste également aux brouillages involontaires 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.

différents composants sont rassemblés en un seul flot : les paquets qui correspondent aux images de *France 2* sont mélangés aux paquets audio de *France 2* (son stéréo, voire plusieurs sons pour un programme multilingue) et aux paquets de sous-titre, etc. Comme ces paquets peuvent être transmis par des moyens asynchrones, voire, dans certains cas, par des itinéraires différents, ils sont munis d'une étiquette qui indique leur rang par rapport aux autres. À la réception, les paquets sont classés selon l'ordre indiqué par les étiquettes et présentés à l'écran dans le bon ordre et au rythme indiqué. Ensuite, les flots des différentes chaînes sont rassemblés en un seul flot global (TF1, *France 2*, *France 3*, etc.).

Finalement, plusieurs de ces flots numériques globaux sont mélangés, soit entre eux, soit avec des signaux analogiques, à des fréquences différentes. Ils sont alors prêts pour la transmission sur le même réseau. On entend ici par «réseau» un ensemble de satellites, un réseau câblé ou un ensemble d'émetteurs terrestres (voir la figure 1).

Accès protégé

Comment limiter l'accès aux programmes payants ? Ce contrôle d'accès est effectué grâce à des suites de nombres totalement imprévisibles à qui-conque n'en connaît pas le principe de construction. Pour cette raison, ces suites sont nommées pseudo-aléatoires. Comment deviner, par exemple, que la suite 2 5 7 2 9 1 0 1 1 2 3 5 8 se poursuit par 3, si l'on ignore que chaque chiffre est le reste de la division par dix de la somme des deux chiffres précédents ? Quand on additionne une telle suite au flot numérique des images, lors de l'émission, on transmet une série de nombres qui, utilisés sans décryptage, engendrent une image incohérente. Des variantes de cette technique permettent de créer des images cryptées qui conservent quelque lisibilité malgré une très mauvaise qualité, afin de susciter l'envie de les obtenir en clair. Toutefois, seule la soustraction, dans un décrypteur associé au téléviseur, de la suite secrète de nombres aux données reçues cryptées recrée les images initiales.

L'appareil de décryptage retrouve la suite secrète s'il connaît les deux valeurs initiales (2 et 5, dans notre exemple) qui constituent la clé instantanée de décryptage. Cette clé est la même pour tous les récepteurs, mais elle diffère pour



5. LES ÉCHOS apparaissent, en transmission analogique, lorsqu'un récepteur capte le signal de deux émetteurs terrestres proches. Comme ces deux émetteurs ne sont pas à la même distance, les deux signaux reçus sont décalés, ce qui provoque les échos. En télévision numérique, le problème sera résolu par l'utilisation de la transmission multiporteuse.

chaque émission cryptée. Cette clé, dont la durée de vie ne dépasse pas quelques secondes, est transmise sous forme chiffrée dans un message spécial nommé ECM (*Entitlement Checking Message*, soit «message de contrôle du cryptage»), qui contient aussi les références de l'émission (il s'agit, par exemple, de la retransmission d'un match de football). L'appareil de décryptage s'assure d'abord que le message ECM qu'il reçoit n'a pas été falsifié en vérifiant sa signature électronique ; les algorithmes d'authentification des ECM reçus sont secrets. Lorsque la carte à puce introduite dans le récepteur confirme que l'abonnement «football» a bien été payé, la clé instantanée est déchiffrée, et l'image reçue est décryptée. Sinon, le décrypteur refusera de calculer la clé, mais proposera l'achat du match si un crédit suffisant figure sur la carte à puce.

Le flot des ECM est permanent pour autoriser un décryptage rapide en cas de changement de chaîne. Comment les abonnements mémorisés par la carte à puce sont-ils mis à jour ? Grâce à un autre message, l'EMM (*Entitlement Management Message*, soit «message de gestion du cryptage»), également protégé du piratage par signature électronique. Cette fois, les EMM sont particuliers à chaque usager, c'est-à-dire à chaque carte à puce. Ils permettront de faire évoluer à distance les droits de cet usager. Les systèmes concurrents diffèrent par leurs

méthodes – jalousement gardées secrètes – de chiffrement des clés et d'authentification des messages EMM ou ECM reçus. En raison de ces différences, les appareils de décryptage des systèmes concurrents sont différents.

Voilà presque 60 ans, les premières émissions expérimentales diffusées de la tour Eiffel montraient la faisabilité d'une technique – la télévision – dont les répercussions sociales étaient alors inimaginables. Sommes-nous aujourd'hui, avec la télévision numérique, à la veille d'un bouleversement du même type ? Sans doute pas : nous n'avons franchi qu'un pas vers la révolution numérique, qui mariera de façon indissociable séquences vraies et images de synthèse. La révolution numérique se borne pour l'instant à élargir le choix du kiosque audiovisuel : limité hier à quelques quotidiens généralistes, il proposera désormais plusieurs dizaines ou centaines de revues spécialisées sur papier glacé.

Jean-Pierre HÉNOT, Vincent MICHON et Bertrand SUEUR ont travaillé, à Rennes, au Centre commun d'études de télédiffusion et télécommunication (CCETT) du groupe *France Télécom*.

Nicholas NEGROPONTE, *L'homme numérique*, Éditions Robert Laffont, 1995.

Hervé BENOÎT, *La télévision numérique*, Éditions Dunod, 1998.

