

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.

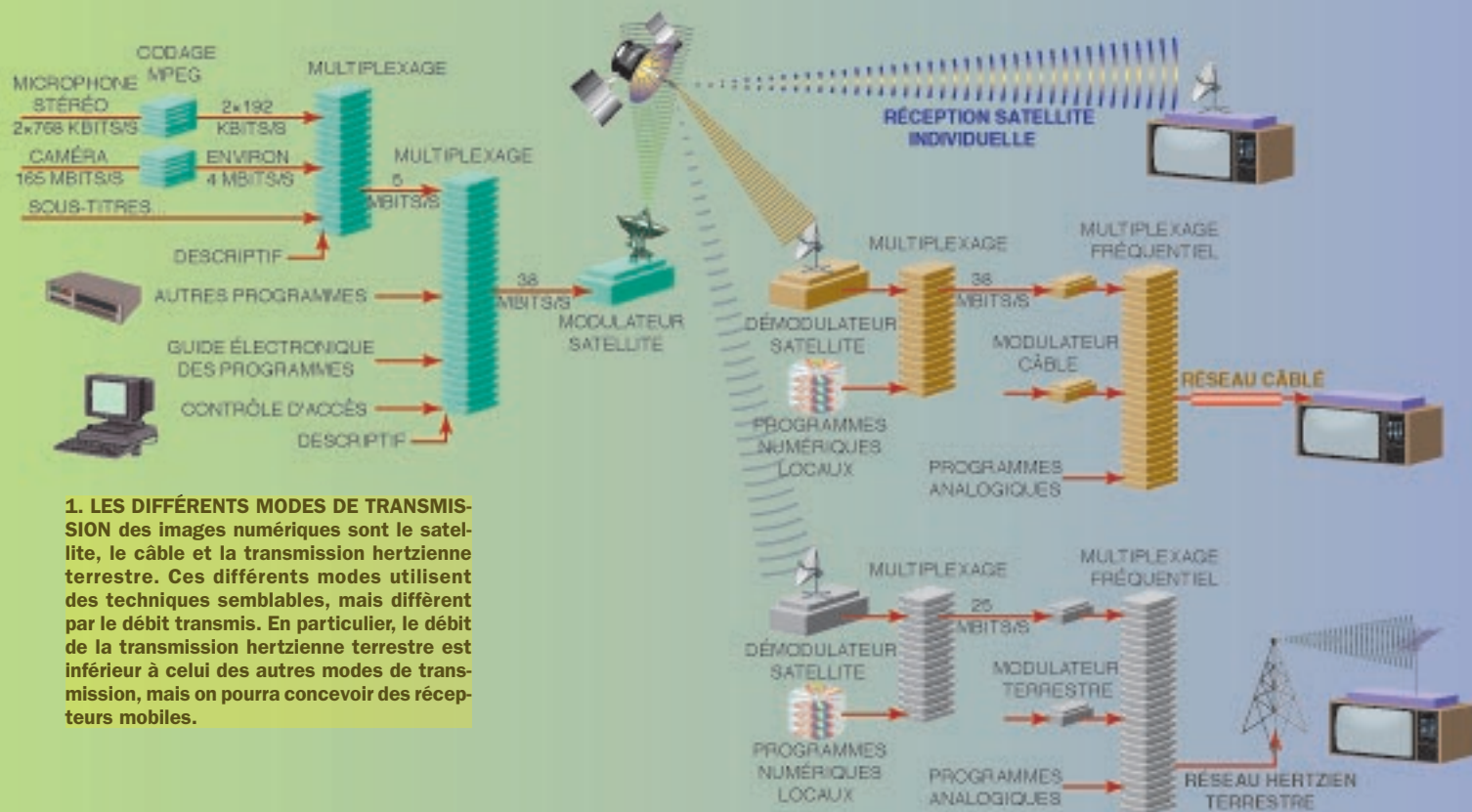
Le son, à l'appui de l'image

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

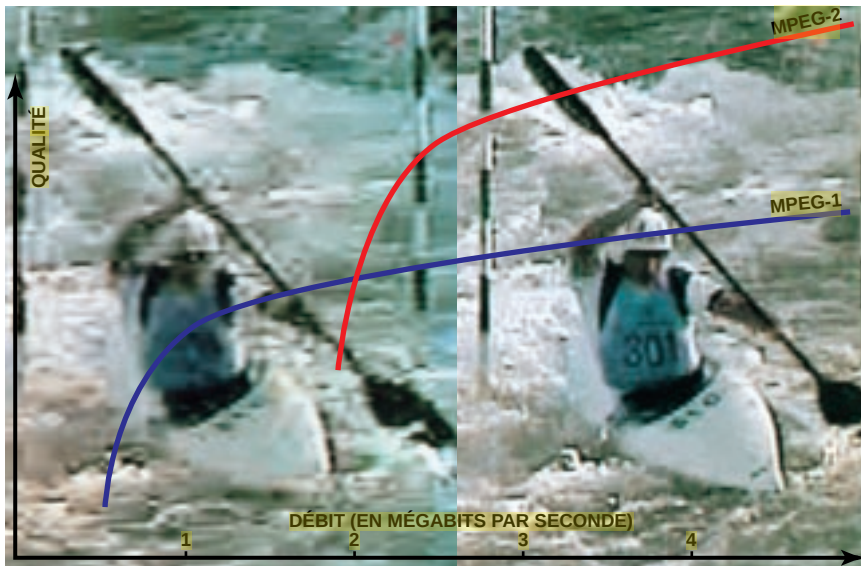
minimum : 48 000 fois par seconde, on code l'intensité du son selon 65 536 niveaux (2^{16}). Le débit occupé par le son est ainsi de 768 kilobits par seconde et, comme la bande passante est une ressource rare, les données audio sont également comprimées.

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 tests, 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