

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 quiconque 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.

La télévision numérique

JAE LIM

Après des années de travail, les États-Unis ont déterminé la norme de télévision numérique qui sera imposée aux chaînes du pays.

Dans quelques mois, la télévision américaine changera autant que lorsque la télévision en couleurs est apparue : en novembre 1998, dans les grandes villes américaines, les chaînes de télévision émettront leurs émissions sous forme numérique, afin de transmettre des images de meilleure définition, et avec un meilleur son, que par le codage analogique actuel. Ce nouveau système de télévision numérique émettra également des données récupérables par les ordinateurs.

De la norme américaine actuelle (NTSC, qui date des années 1950) à la nouvelle norme numérique, la transition a été difficile. Après des années de compétition et de coopération, les professionnels concernés, chaînes de télévision, constructeurs de matériel électronique et universitaires, ont abouti à une norme qui ne rend pas obsolètes les téléviseurs existants. Certains détails ne sont pas encore fixés, notamment les modalités d'introduction de services informatiques dans le domaine de la télévision.

Cependant, la situation internationale reste floue. Pour l'instant, seuls le Canada et la République de Corée ont adopté la norme numérique américaine.

La plupart des difficultés ont été résolues, et les progrès réalisés dans le domaine des communications, dans le traitement du signal et en micro-électronique ont dépoussiéré une technique vieille d'un demi-siècle. Le nouveau système utilisera des canaux situés essentiellement dans la bande UHF (*Ultra High Frequency*, soit «ultra haute fréquence»), entre 470 et 890 mégahertz (canaux 14 à 83). L'ancien et le nouveau système coexisteront jusqu'en 2006, c'est-à-dire jusqu'au moment où les chaînes de télévision cesseront vraisemblablement d'utiliser les signaux NTSC à la fois dans la bande VHF (*Very High Frequency*, soit «très haute fréquence»), entre 54 et 216 mégahertz

(canaux 2 à 13), et dans la bande UHF. La Commission américaine des télécommunications (FCC) pourra alors allouer ces canaux vacants à la télévision numérique ou à d'autres services, comme les radiocommunications.

Initialement, la Commission américaine des télécommunications n'imposait de normes techniques qu'aux chaînes de télévision hertziennes, mais son influence s'est ensuite étendue aux opérateurs du câble et du satellite, parce que ceux-ci ont voulu limiter les études et réduire les coûts. Une difficulté est apparue quand certains opérateurs du câble et du satellite ont fait cavalier seul en émettant des signaux numériques, mais pas en haute définition. L'évolution vers la haute définition a duré trois décennies.

À la fin des années 1960, la chaîne japonaise NHK collabora avec les fabricants japonais de composants électroniques pour mettre au point un codage analogique nommé MUSE (*MUltiple Sub-nyquist Encoding*, soit «codage par sous-échantillonnage multiple»). Utilisant cinq fois plus de données qu'aujourd'hui pour produire chaque image avec une meilleure définition, cette diffusion nécessitait également cinq fois plus de bande passante : alors que le codage NTSC utilise un canal de six mégahertz de largeur pour transmettre ses signaux audio et vidéo, le système MUSE nécessitait 30 mégahertz. Toutefois, à l'époque déjà, alors que le spectre électromagnétique était très peu utilisé, la norme MUSE semblait excessivement lourde.

La norme NTSC profitait de l'espace électromagnétique libre ; elle semble aujourd'hui très peu parcimonieuse. Dans la transmission d'images, les intensités des éléments adjacents constituant l'image (les pixels) sont souvent très similaires ou, du moins, dépendent de l'intensité des pixels contigus. Le système NTSC transmet des images

entières sans exploiter cette dépendance, et une grande partie de l'information transmise est redondante. Progressivement, des interférences entre les différents signaux NTSC apparaissent.

Pour y remédier, la Commission américaine des télécommunications décida de ne pas utiliser des bandes du spectre électromagnétique – les canaux tabous – entre les bandes attribuées aux chaînes. Généralement, dans les régions densément peuplées des États-Unis, seul un canal VHF sur deux et un canal UHF sur six sont attribués. Avec l'avènement des téléphones portables et des autres services de télécommunications, le spectre électromagnétique américain est devenu trop petit pour des normes telles que MUSE. En 1988, des industriels et des laboratoires de recherche publics et privés proposèrent des normes de diffusion numérique.

Des approches antagonistes

Alors que l'évaluation technique des différentes normes proposées commençait, la Commission américaine des télécommunications prit une décision déterminante : en mars 1990, elle opta pour une incompatibilité des nouvelles normes avec les récepteurs existants.

Une approche compatible aurait permis aux téléviseurs actuels de former des images de qualité acceptable à partir des signaux numériques de télévision en haute définition. Une telle compatibilité avait été conservée lors du passage à la télévision en couleurs : les téléviseurs noir et blanc pouvaient former une image noir et blanc avec le signal d'une image couleur. Toutefois, lors des études, la Commission américaine jugea que la conservation de la compatibilité des récepteurs nécessitait une augmentation excessive de la largeur de bande, et elle préféra une approche nom-