

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.

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'auparavant 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-



Edwin H. Rensberg, Gamma Liaison

TÉLÉVISION ANALOGIQUE



1. LES DIFFUSEURS SE PRÉPARENT au passage à la télévision numérique. Ainsi, la chaîne NBC, à Washington (*en haut*), s'est équipée de caméras de télévision numériques et de systèmes d'enregistrement de qualité supérieure. La télévision numérique peut

TÉLÉVISION NUMÉRIQUE EN HAUTE DÉFINITION



Massachusetts Institute of Technology

offrir une image très nette, en haute définition, et un rapport de la largeur à la hauteur de l'écran supérieur à celui du système actuel (*comparaison simulée ci-dessus*). Le format 16/9 est proche du format utilisé au cinéma.

mée *Simulcast*. Un signal en *Simulcast* serait diffusé dans son propre canal de six mégahertz de large, indépendamment du signal NTSC. De cette façon, le système de transmission partirait sur des bases neuves.

Comment éviter de pénaliser les possesseurs de téléviseurs à la norme NTSC? La Commission américaine des télécommunications décida d'attribuer un nouveau canal à chaque chaîne qui en ferait la demande, à condition que les deux diffusions coexistent pen-

dant une période de transition. Initialement, la Commission voulait que le même programme soit diffusé simultanément ou avec un léger décalage sur les deux canaux, d'où le nom *Simulcast* ou «diffusion simultanée», mais cette exigence fut ensuite abandonnée. Une fois la télévision en haute définition (TVHD) suffisamment répandue, la diffusion à la norme NTSC cessera. L'espace hertzien dégagé sera alors attribué à des canaux TVHD supplémentaires ou à d'autres services.

L'approche *Simulcast* a de nombreux avantages : elle requiert moins de puissance et interfère moins avec d'autres signaux, notamment avec le signal NTSC, de sorte que les canaux tabous seront utilisables. De surcroît, après la période de transition, le procédé *Simulcast* éliminera les canaux NTSC utilisant le spectre avec un mauvais rendement. Enfin, la suppression des signaux NTSC, qui engendrent de fortes interférences, permet une meilleure utilisation des autres canaux.

L'Europe face aux États-Unis

Dans la lutte d'influence qui s'est engagée pour conquérir les marchés asiatique, australien et Sud-américain, la norme de télévision haute définition américaine a plusieurs handicaps dont l'Europe pourrait profiter.

L'Europe s'est dotée d'une structure technique et décisionnelle unique, le Consortium DVB (pour *Digital Video Broadcast*, soit «diffusion vidéo numérique»), qui rassemble plus de 200 acteurs européens du monde audiovisuel (centres de recherche, fabricants d'équipements professionnels ou de téléviseurs grand public, instances de régulation, sociétés de production de programmes, opérateurs de télécommunications, etc.). Ces experts ont su s'entendre sur un certain nombre de normes qui définissent progressivement le paysage audiovisuel européen du siècle prochain : on trouve ainsi une norme DVB pour le codage des images et des sons, une autre pour la diffusion par satellite, une pour la distribution par câbles, une pour la diffusion terrestre, une pour l'interface des équipements de studios, etc. Tous les aspects de la chaîne de l'image numérique ont ainsi fait l'objet d'une recommandation applicable à l'Europe entière.

Cette démarche globale garantit une cohérence technique pour l'ensemble du monde audiovisuel et évite les solutions nationales ou privées incompatibles. L'Europe ne veut pas réitérer les erreurs des années 1960, quand s'affrontèrent deux normes de qualité identique, mais incompatibles (PAL et SECAM), déclinées de surcroît en de multiples variantes nationales. N'ayant pas su canaliser la révolution numérique, les États-Unis se retrouvent avec différents systèmes incompatibles, tant sur satellites que sur réseaux câblés, et ils n'ont pas cette palette de normes qui donne au concept DVB sa cohérence.

Pour diffuser la télévision en haute définition par le réseau terrestre classique, les États-Unis ont retenu le concept *Simulcast*, après nombre de redéfinitions. Ce principe consiste à promouvoir la haute définition en attribuant gratuitement à chaque diffuseur d'un programme classique un autre canal, à la condition qu'il le remplisse avec un programme numérique en haute définition. Avec l'avènement des écrans plats de grande taille, la télévision en haute définition est techniquement envisageable à moyen terme. Toutefois, en raison du prix élevé des ces écrans, les publicitaires doutent de l'intérêt d'annoncer sur les nouveaux canaux à audience trop restreinte. Qui financera alors la produc-

tion de programmes en haute définition ? Pour élargir l'audience de ces programmes, les chaînes ont réclamé des décodeurs numériques bon marché que les téléspectateurs adjoindraient à leur téléviseur classique : l'émission diffusée en haute définition serait alors convertie en une image ordinaire. N'eût-il pas été préférable de transmettre dans le canal alloué plusieurs programmes numériques classiques, plutôt qu'un unique programme en haute définition voué, dans l'immense majorité des cas, à être visualisé comme une image ordinaire ?

L'approche européenne est plus pragmatique, car elle utilise toute la flexibilité des techniques numériques et laisse aux diffuseurs le libre choix d'utiliser comme ils l'entendent – et comme le marché les y encourage – la ressource de chaque canal. Avec la norme européenne, on peut transmettre des images en résolution ordinaire et des images en haute résolution selon le contenu esthétique des images. Le système américain diffusera un unique programme en haute définition à raison de 19 mégabits par seconde. En Europe, le système retenu est plus souple puisque le débit sera ajustable, entre 4 et 32 mégabits par seconde.

Comment les images et les sons codés seront-ils transmis ? La télévision terrestre américaine a répondu à cette question cruciale (elle détermine la qualité des programmes effectivement reçus par les téléspectateurs) par des solutions techniques classiques, impropres à une réception portable et, encore plus, à une réception mobile. En revanche, la solution multiporteuse des Européens – initialement mise au point pour la réception de programmes audionumériques dans les voitures (DAB) – est d'une souplesse et d'une robustesse telles qu'elle élargit le champ des services futurs possibles. Seule technique connue autorisant la conception de réseaux monofréquences, elle utilise les précieuses ressources spectrales (ces fameuses bandes de fréquences si disputées...) bien plus efficacement que la norme américaine ne le permet.

L'Europe a récemment imposé sa norme GSM de téléphonie numérique mobile ; saura-t-elle rééditer l'exploit et transformer en suprématie mondiale sa supériorité technique dans le domaine de la télévision numérique ?

Bertrand SUEUR, Laboratoire diffusion et distribution hertzienne, CCETT, Rennes

Ce choix du *Simulcast*, en 1990, fut un élément déterminant dans le processus de standardisation de la télévision numérique aux États-Unis. Peu après, cinq normes fondées sur *Simulcast* furent proposées. L'une d'elles préconisait un système analogique, tandis que les quatre autres étaient entièrement numériques.

En février 1993, un comité étudia les résultats et conclut que, si les quatre systèmes numériques étaient nettement plus performants que le système analogique, chacun d'entre eux avait ses points forts, si bien qu'il ne pouvait en recommander un en particulier. Les experts préconisèrent de tester à nouveau les quatre normes numériques quand elles auraient été améliorées par leurs concepteurs. Toutefois, les autorités recommandèrent aux auteurs des quatre projets de combiner les meilleures parties de leurs normes, afin de soumettre un seul système à évaluation.

Vers un standard unique

Les quatre concepteurs de systèmes numériques acceptèrent cette idée d'un projet commun. En mai 1993, ils constituèrent un consortium formé de sept organismes et sociétés dont la Société AT&T, la Société *Zenith*, l'Institut de technologie du Massachusetts, la Société *Philips Electronics* et la Société française *Thomson Électronique*. Entre 1993 et 1994, ce consortium choisit les meilleurs éléments techniques des quatre normes et les améliora. Une norme technique fut élaborée.

Pour diffuser des images en haute définition sans compression de données, on doit transmettre un milliard de bits par seconde. Comme le débit d'un canal à six mégahertz est seulement de 20 millions de bits par seconde, le consortium adopta le format de compression nommé MPEG-2 (l'acronyme de *Moving Pictures Experts Group*, soit «groupe d'experts en images animées»): les images ne sont pas transmises intégralement; dans le format MPEG, seules les modifications des images sont communiquées. Par exemple, lors de la diffusion du journal télévisé, le système MPEG-2 ne transmet pas continuellement les images du plateau ou du fond, qui restent fixes, mais principalement les mouvements du présentateur.

Les signaux numériques comprimés provenant de différentes sources, vidéo, audio ou autres, sont d'abord multiplexés, c'est-à-dire transformés



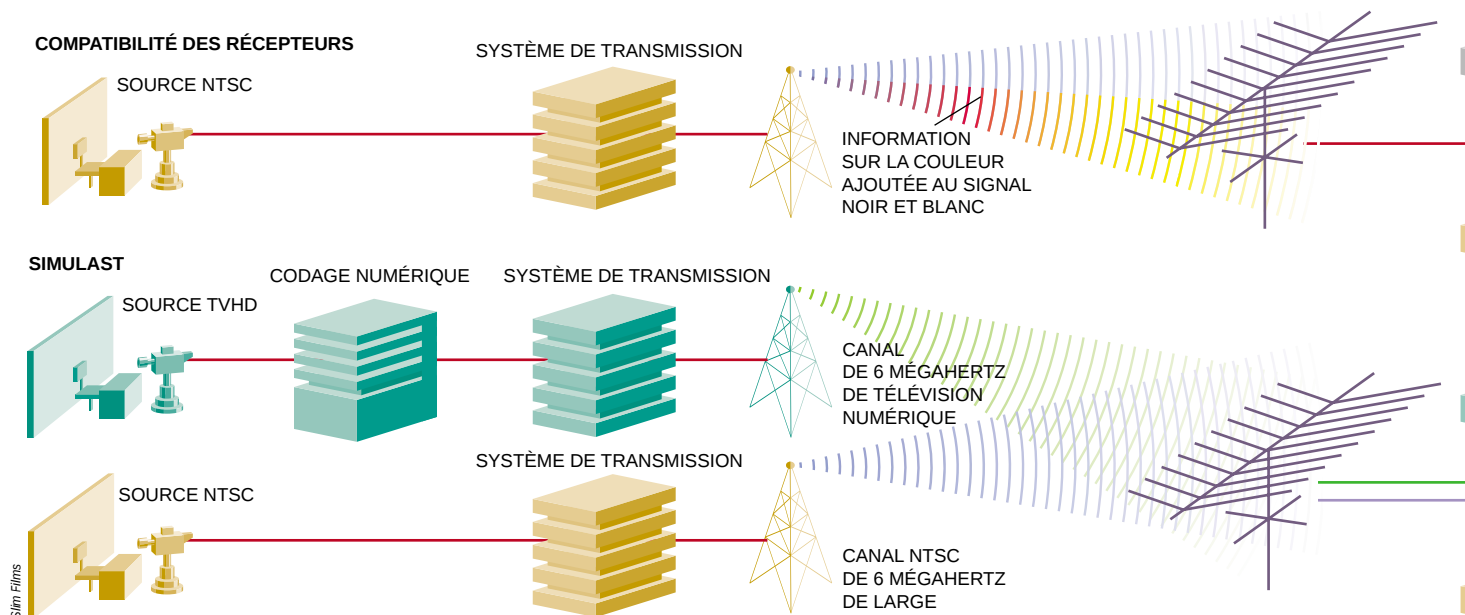
ONDES ET ONDELETTES

B. Burke Hubbard

L'élaboration des ondelettes est une saga moderne. Fourier a inventé la décomposition d'un signal en éléments simples ; pour les besoins de l'analyse du signal, physiciens et mathématiciens ont inventé une nouvelle décomposition en ondelettes. Celle-ci est utile dans de nombreuses applications et ses richesses ne sont pas toutes exploitées.

Barbara Burke Hubbard est écrivain scientifique : elle retrace avec simplicité et chaleur comment les scientifiques pensent et hésitent avant que n'écloie une idée, et comment ils coopèrent. Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN



2. LA COMPATIBILITÉ DES SYSTÈMES a été abandonnée par la Commission américaine des télécommunications : les téléviseurs actuels ne sauront pas utiliser les nouveaux signaux numériques (TVHD), pour former des images en haute définition. La compatibilité fut conservée lors de l'introduction de la télévision en couleurs,

dont les informations pouvaient être transmises dans un canal de six mégahertz. Comme un seul canal ne peut transmettre à la fois un signal en haute définition et un signal NTSC, la Commission américaine des télécommunications a adopté l'approche *Simulcast*, qui demande aux diffuseurs d'émettre les deux types de signaux.

en une unique séquence de bits. Puis on utilise cette séquence de bits pour modifier l'amplitude d'une onde électromagnétique, nommée porteuse, qui est alors transmise par voie hertzienne. Quand une antenne capte le signal, celui-ci est démodulé par un récepteur, qui soustrait l'intensité de la porteuse et récupère une séquence de chiffres binaires. Cette séquence est démultiplexée (on sépare les données audio, sonores, etc.), et les signaux sont finalement décomprimés.

En novembre 1995, la Commission des télécommunications a adopté la norme MPEG-2 (également retenue en Europe). Dès l'automne prochain, les principaux diffuseurs transmettront des signaux de télévision numérique dans les grandes zones urbaines, notamment à Boston, Los Angeles et Washington.

De surcroît, le nouveau standard est évolutif. Par exemple, la norme MPEG-2 spécifie uniquement la syntaxe des séquences binaires codées et le procédé de décodage. Cette liberté autorise une évolution du codage, sans que le standard soit modifié.

Que faire des téléviseurs actuels, qui ne pourront interpréter le nouveau signal numérique ? Pour bénéficier de l'image numérique en haute définition, on devra soit leur adjoindre un décodeur de signal numérique, soit le changer pour un nouvel appareil. Des téléviseurs numériques seront com-

mercialisés dès l'automne 1998. Un téléviseur numérique à tube cathodique grand écran qui affichera la haute résolution coûtera initialement près de 30 000 francs, mais les prix devraient baisser rapidement.

Réception de l'image numérique

L'adjonction d'un boîtier de décodage à un téléviseur classique coûtera moins de 3 000 francs. Ce boîtier transformera le signal numérique en un signal analogique NTSC. Le spectateur ne profitera alors pas de la haute résolution, mais la qualité de l'image sera légèrement supérieure à celle du même programme diffusé par le canal NTSC analogique.

L'amélioration de la qualité de réception sera également perceptible, même sans téléviseur numérique : dans les limites d'une zone de couverture donnée, le signal vidéo sera parfait, et notamment, exempt des parasites gênants, tels les images fantômes ou le bruit de fond (neige sur l'écran). Hors de la zone de couverture, on ne recevra aucune image. Cette situation du tout ou rien est analogue à ce qui se passe en musique numérique, où la lecture d'un disque compact sale ou endommagé est impossible.

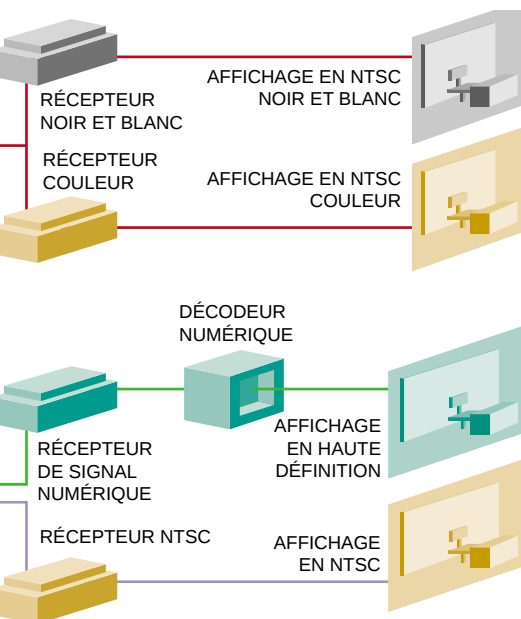
Pour ceux qui disposeront des téléviseurs à la nouvelle norme, l'amé-

lioration de la qualité sera considérable. Avec le système NTSC, on ne perçoit pas le balayage par lignes à partir d'une distance égale à sept fois la hauteur de l'écran. Ainsi, pour un écran de 66 centimètres de hauteur (ou un mètre de diagonale), l'éloignement recommandé est de 4,25 mètres, ce qui rend difficile l'installation d'un téléviseur grand écran dans de nombreux foyers et réduit l'angle de vision à dix degrés environ.

Pour la télévision numérique en haute définition, l'éloignement recommandé sera seulement trois fois la hauteur de l'image : pour le téléviseur décrit précédemment, on pourra se placer à 1,80 mètre. Avec un écran plus grand, on disposera d'un champ de vision plus large et plus réaliste, d'environ 30 degrés.

Avec la nouvelle norme, le rapport de la largeur à la hauteur de l'image est augmenté. Un téléviseur NTSC affiche des images avec un rapport largeur sur hauteur égal à 4/3. Pour se rapprocher du format large du cinéma, la télévision numérique proposera des images au format 16/9 (format déjà disponible en SECAM).

Le son sera de qualité égale à celle des disques compacts. Grâce à des canaux audio additionnels, les spectateurs pourront être «entourés de son», comme dans les salles de cinéma. Ces canaux additionnels pourront égale-



ment transmettre des doublages des films en plusieurs langues.

Le nouveau système numérique entraînera un changement, peut-être plus radical, dans l'utilisation du poste de télévision. Alors que la télévision est aujourd'hui un appareil de loisir, la transmission numérique apportera des données variées, le courrier électronique. Le téléviseur pourra même être utilisé comme visiophone, ou comme moniteur d'ordinateur.

Cette intégration des systèmes a poussé l'industrie informatique à pénétrer dans un domaine dominé jusqu'ici par les chaînes de télévision. Des deux côtés, il reste encore beaucoup de travail, mais la convergence semble inévitable. Cette intégration pourrait finalement modifier l'approche de la télévision bien plus radicalement que l'amélioration de l'image et du son numérique.

Jae LIM enseigne au département de génie électrique et d'informatique de l'Institut de technologie du Massachusetts.

Jae S. LIM, *Two-Dimensional Signal and Image Processing*, Prentice-Hall, 1990.

A.N. NETRAVALI et B.G. HASKELL, *Digital Pictures : Representation, Compression and Standards*, deuxième édition, Plenum Press, 1995.

HDTV and the New Digital Television, numéro spécial de IEEE Spectrum, vol. 32, n° 4, pp. 34-79, avril 1995.

ATSC Digital Television Standard, Advanced Television Systems Committee, 16 septembre 1995.
