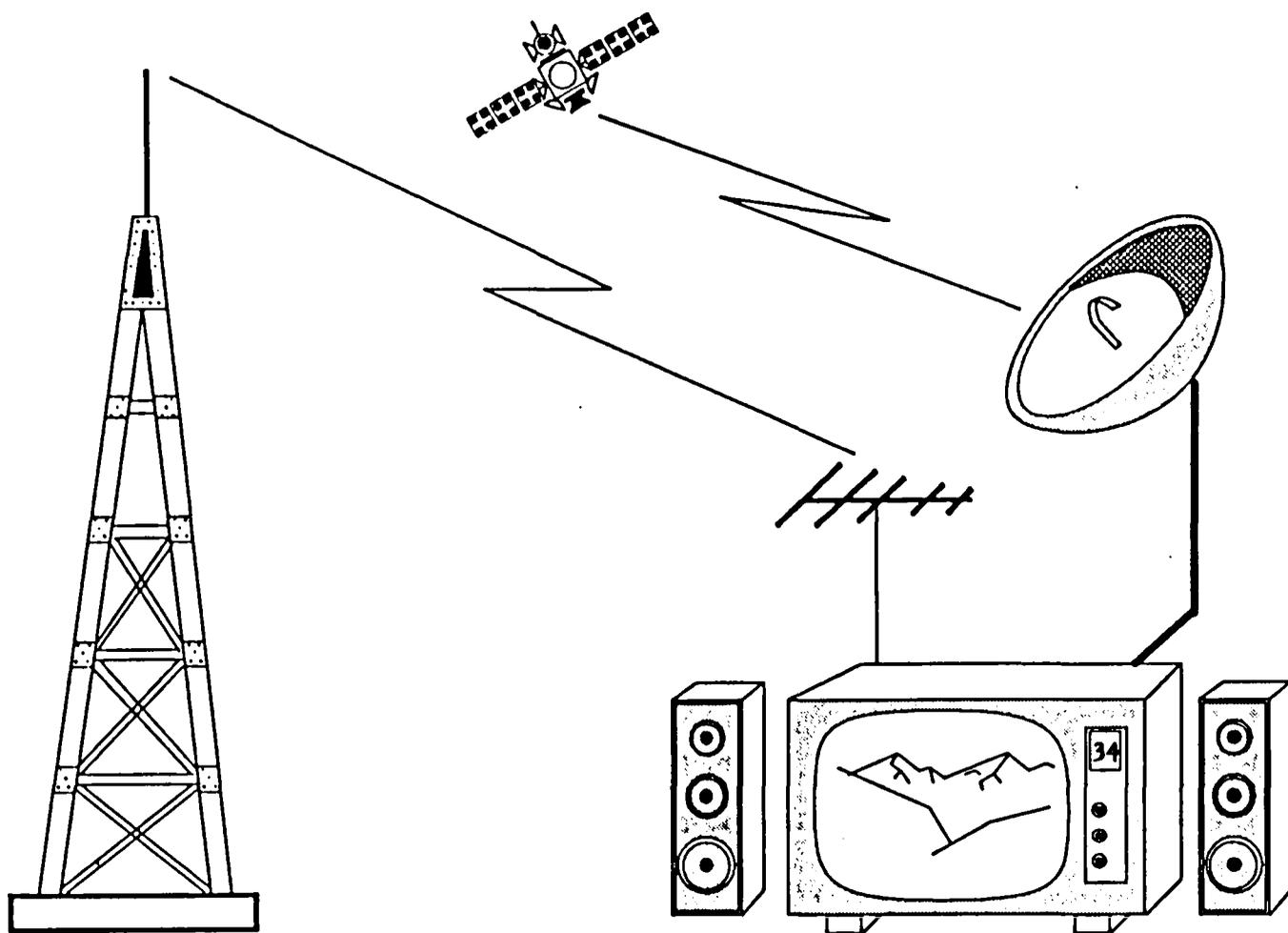




UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

1992 - RECOMMANDATIONS DU CCIR

(Nouvelles et révisées en date du 15 septembre 1992)



Série RBT

SERVICE DE RADIODIFFUSION (TÉLÉVISION)



COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS
ISBN 92-61-04592-8



Genève, 1992

© UIT 1992

Tous droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.



Recommandation 798 (1992)

Radiodiffusion télévisuelle numérique de terre dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques

Extrait de la publication :

Recommandations CCIR : Série RBT : Service de radiodiffusion (télévision)
(Genève : UIT, 1992), pp. 11-34

This electronic version (PDF) was scanned by the International Telecommunication Union (ITU) Library & Archives Service from an original paper document in the ITU Library & Archives collections.

La présente version électronique (PDF) a été numérisée par le Service de la bibliothèque et des archives de l'Union internationale des télécommunications (UIT) à partir d'un document papier original des collections de ce service.

Esta versión electrónica (PDF) ha sido escaneada por el Servicio de Biblioteca y Archivos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a partir de un documento impreso original de las colecciones del Servicio de Biblioteca y Archivos de la UIT.

(ITU) للاتصالات الدولي الاتحاد في والمحفوظات المكتبة قسم أجراه الضوئي بالمسح تصوير نتاج (PDF) الإلكترونية النسخة هذه والمحفوظات المكتبة قسم في المتوفرة الوثائق ضمن أصلية ورقية وثيقة من نقلاً.

此电子版（PDF版本）由国际电信联盟（ITU）图书馆和档案室利用存于该处的纸质文件扫描提供。

Настоящий электронный вариант (PDF) был подготовлен в библиотечно-архивной службе Международного союза электросвязи путем сканирования исходного документа в бумажной форме из библиотечно-архивной службы МСЭ.

RECOMMANDATION 798

**RADIODIFFUSION TÉLÉVISUELLE NUMÉRIQUE DE TERRE
DANS LES BANDES D'ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES***

(Question 121/11)

(1992)

Le CCIR,

considérant

- a) que la Question 121/11 concerne la radiodiffusion de Terre de signaux numériques de TV[HD];
- b) qu'il se peut que certains pays introduisent la radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre (qui inclut la TVHD) dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques;
- c) qu'à l'heure actuelle les bandes d'ondes métriques et décimétriques sont exploitées pour la radiodiffusion télévisuelle analogique (Recommandation 470) et sont très encombrées dans certains pays;
- d) qu'il y aura donc sans doute partage dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques entre la radiodiffusion télévisuelle analogique et la radiodiffusion télévisuelle numérique,

recommande

1. que, dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques la radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre tienne dans les canaux (de 6, 7 et 8 MHz) prévus pour l'émission de télévision analogique;
2. que l'on veille à ce que la radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre ne provoque pas de brouillages subjectivement plus sévères que ceux qui sont jugés acceptables pour les services actuels de radiodiffusion en bandes d'ondes métriques et décimétriques;
3. que la radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre résiste assez bien aux brouillages pour pouvoir coexister avec les services actuels de radiodiffusion dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques.

Note 1 – Des informations sur les développements en cours de la radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre sont données dans l'Annexe 1.

ANNEXE 1

**Radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre
dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques**

1. Introduction

La plupart des radiodiffuseurs actuels exploitent des systèmes d'émission à Terre dans les bandes de fréquences d'ondes métriques et décimétriques. Pour le futur, il conviendra d'étudier et de prendre en compte les méthodes pouvant être utilisées pour le codage numérique des signaux d'image de télévision à haute définition et du signal son associé en radiodiffusion à partir d'émetteurs de Terre.

Au niveau de la caméra et du récepteur, les signaux respectivement d'entrée et de sortie des systèmes de télévision sont essentiellement analogiques. Il est donc logique de se demander, à propos de la radiodiffusion télévisuelle, «quel est l'intérêt du numérique?». Alors que les dégradations du signal analogique sont cumulatives et difficiles à éliminer du signal vidéo, la possibilité de reconstituer exactement le train d'impulsions numériques garantit en principe l'immunité des signaux numériques vis-à-vis des détériorations venues de sources extérieures. On peut entrelacer plusieurs trains binaires numériques. Ce processus permet d'émettre, transmettre, stocker et traiter des signaux auxiliaires en même temps que la vidéo. La réduction de redondance pour comprimer l'image est un procédé très efficace dans un contexte numérique et on envisage de le retenir pour la radiodiffusion de Terre de la TVHD.

* La radiodiffusion télévisuelle en bandes d'ondes métriques et décimétriques se fait dans les Bandes I à V.

Plusieurs administrations ont commencé à étudier des systèmes de radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre. Les objectifs de qualité qu'elles poursuivent vont de la télévision conventionnelle à la TVHD. Dans la présente Annexe, l'expression «radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre» couvre tous ces services.

Pour définir un système de radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre, il faut recourir à des méthodes évoluées de codage à la source, de codage de canal et de modulation, ainsi qu'à des études approfondies de planification de fréquences. Il faut aussi penser à la coordination avec d'autres médias.

On notera que de nombreuses conceptions de système, techniques et préoccupations décrites ci-après région par région sont d'intérêt universel et font l'objet d'études partout où des travaux de développement se poursuivent.

2. Réalisations nouvelles en Europe

2.1 Introduction

L'expérience acquise en Europe à propos des techniques de réduction du débit binaire et de la modulation numériques, tant pour l'image que pour le son, est considérable. Des normes européennes ont été mises au point pour les échanges en numérique de programmes de télévision en composantes à 34-45 Mbit/s et 140 Mbit/s, grâce aux résultats des travaux de plusieurs projets conjoints européens comme EUREKA 256, RACE HIVITS et de la CMTT. Un projet distinct, EUREKA VADIS, a pour but de mettre au point la technologie de distribution de systèmes vidéo numériques jusqu'à 10 Mbit/s, dans la perspective d'une normalisation par l'ISO. En outre, de nombreux travaux ont déjà eu pour objet la radiodiffusion sonore numérique et des démonstrations très réussies ont eu lieu.

Bon nombre de laboratoires européens s'occupent toujours de la réduction du débit binaire et l'on s'intéresse de plus en plus à son application à la radiodiffusion télévisuelle. Dans le cadre de la Tâche 813 de RACE, un nouveau grand projet de coopération propose à présent de coordonner cette activité et de mettre au point des techniques valables pour la radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre. On s'efforcera de combiner des méthodes de codage à la source avec le codage de canal au moyen de techniques de modulation évoluées et d'examiner les questions de planification de fréquences, compte tenu de l'encombrement propre à l'Europe des bandes de radiodiffusion en bandes d'ondes métriques et décimétriques. La Suède et la Norvège étudient aussi la radiodiffusion de TVHD numérique de Terre.

2.2 Travaux en cours

2.2.1 Travaux en Suède et en Norvège

Swedish Telecom, en collaboration avec Norwegian Telecom et la Swedish broadcasting corporation, ont commencé à mettre au point un prototype de système de TVHD numérique de Terre. Il fera l'objet d'expériences et de démonstrations sur des émetteurs de télévision et la première étape du projet doit être achevée au milieu de l'année 1992.

Il est essentiel de mettre au point un système de TVHD qui convienne aux réseaux de Terre car ceux-ci desserviront encore longtemps une grande partie de la population et offrent la possibilité d'émissions régionales. Ce type de système peut s'adapter à d'autres moyens de transmission comme les réseaux de télévision par câble, les satellites de télévision et les futurs réseaux à large bande. Il importe au public qu'on ménage l'avenir en dégageant une solution faisant appel à un seul type de récepteur pour tous les supports de transmission.

C'est dans cette perspective qu'il faut considérer le projet suédo-norvégien. Il vise surtout à mieux maîtriser les techniques d'émission numérique pour la TVHD et à démontrer leurs possibilités. A un second stade, les travaux porteront surtout sur les aspects système et le perfectionnement des divers sous-systèmes.

2.2.2 Réalisations nouvelles au Royaume-Uni

Au Royaume-Uni, National Transcommunications Ltd. (NTL) a entrepris pour le compte de l'Independent Television Commission (ITC) un important programme de recherches appelé SPECTRE (Special Purpose Extra Channels for Terrestrial Resolution Enhancements – Canaux supplémentaires à destination spéciale pour améliorations de la résolution à Terre).

Ce programme a pour objet de déterminer le moyen le plus efficace d'utiliser toute la voie de radiodiffusion de Terre grâce à des techniques numériques qui tirent le meilleur parti de la redondance inhérente au réseau actuel PAL en bande décimétrique dont la planification pour l'émission analogique remonte à 1961. On recherche des méthodes d'émission numérique qui tiendraient dans les canaux de télévision normalisés de 8 MHz en bande décimétrique et pourraient coexister avec les services PAL actuels. On étudie notamment le codage vidéo à faible

débit binaire en fonction de la qualité du service ainsi que les méthodes de modulation numérique et l'émission de canaux supplémentaires dans les bandes de radiodiffusion actuelles.

2.2.2.1 Codage vidéo à faible débit binaire et qualité de service

On a mis au point une technique de codage par transformation en cosinus discrète (TCD) hybride à compensation du mouvement. Pour pouvoir rivaliser avec la distribution de haute qualité par satellite, il faut qu'un service numérique de Terre de haute qualité offre des images de format 16:9 en composantes avec, à la source, une résolution minimale de 720×576 échantillons par image (pour la luminance).

Il ressort d'expériences récentes effectuées sur la réduction du débit binaire pour de telles images, au moyen d'une TCD hybride avec codage par interpolation, prédiction et compensation du mouvement, qu'à 12 Mbit/s environ on peut obtenir une qualité élevée pour la plupart des images de radiodiffusion télévisuelle.

S'il n'y a pas d'erreur de transmission, la qualité de l'image sera celle que permet le codage à faible débit binaire et réduction de la redondance. Cette qualité n'est pas constante car elle dépend beaucoup du contenu statistique de l'image codée. On continue donc à étudier des méthodes d'évaluation du caractère critique des séquences d'images afin de mettre au point des techniques permettant de déterminer la qualité du service avec des images codées à de faibles débits binaires.

2.2.2.2 Méthodes de modulation numériques

D'après les études, il n'est possible de partager une bande entre une émission numérique et les services analogiques existants que si le signal numérique est émis à très faible puissance afin de ne pas provoquer de brouillage. Cela est possible avec le signal numérique car, en l'absence de brouillages, les rapports porteuse/bruit qui sont normalement nécessaires à sa réception sont d'environ 15 dB alors qu'il faut plus de 40 dB pour avoir une qualité d'image 4 en télévision analogique. Puisque l'on peut disposer désormais de récepteurs à faible facteur de bruit, il suffirait pour obtenir la même couverture d'émettre un signal numérique à une puissance de 30 dB inférieure à celle qui serait nécessaire avec un signal de télévision analogique classique. Toutefois, un signal numérique à aussi faible puissance sera exploité en présence de brouillages très sévères et il faudra donc absolument retenir un système de modulation approprié.

On a étudié notamment le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (MROF). On utilise alors un grand nombre de porteuses régulièrement espacées en fréquence, chacune d'elles étant modulée selon une méthode numérique du type MDP-4. Le spectre global d'un signal MROF est une bonne approximation d'un spectre rectangulaire, spectre qui s'accommode bien de la propagation par trajets multiples. Cette forme de spectre donne d'excellents résultats car la période binaire de chaque porteuse est nettement plus longue que le retard d'une réflexion courante. De plus, il est possible de rejeter de faibles portions du spectre émis, par exemple aux fréquences des porteuses image ou son des émissions analogiques dans le même canal, pour obtenir une protection entre services analogiques et numériques.

2.2.2.3 Emission de canaux supplémentaires dans les bandes de radiodiffusion existantes

Un service numérique tolérera de la part d'un service analogique de très forts niveaux de brouillages si bien que la distance de réutilisation de fréquences entre services numériques et analogiques peut être considérablement réduite. Selon les études actuelles qui se poursuivent, on pourrait peut-être attribuer quatre canaux numériques à la plupart des sites d'émission.

La situation des réémetteurs est plus compliquée car ils prennent des fréquences qui autrement seraient disponibles pour les émissions numériques. Il semble toutefois pour le moment qu'il serait possible de trouver des canaux pour diffuser un nouveau service numérique à partir de la plupart des stations existant au Royaume-Uni. Il sera sans doute plus difficile d'implanter les émetteurs côtiers qui ne sont séparés de pays voisins que par un court trajet maritime.

2.2.2.4 Résultats

Les études en cours au Royaume-Uni ont montré que la technologie de la télévision numérique permettra sans doute d'utiliser plus efficacement le spectre de radiodiffusion en bande décimétrique et de disposer d'un bon nombre de canaux supplémentaires susceptibles de partager la bande de radiodiffusion avec les services de télévision existants.

Pour le moment, seule la modulation MDP-4 de porteuses MROF a été envisagée. Des modulations d'ordre plus élevé sont intéressantes, notamment celles à 16 niveaux, car on pourrait acheminer un débit binaire de 24 Mbit/s (après correction des erreurs) dans un canal en bande d'ondes décimétriques de Terre de 8 MHz.

Selon l'expérience actuelle, un système à 12 Mbit/s donne une qualité à peu près équivalente à celle du MAC et un débit de 24 Mbit/s serait sans doute nécessaire pour des images à haute définition sur grand écran. Il existe évidemment des variantes intermédiaires qui font un compromis entre le fonctionnement en présence d'erreurs et la qualité de l'image, et les études se poursuivent.

2.2.3 *Projet EUREKA VADIS (codage à la source)*

Dans le cadre du programme européen «EUREKA» un important nouveau projet de recherche commun sur la télévision numérique a été lancé: EUREKA 625. Plus de 30 organismes de 12 pays d'Europe se sont mis d'accord pour développer ensemble la technologie de codage à la source qui permettra à tous les foyers et bureaux de disposer d'une télévision entièrement numérique.

Le projet est désigné par ses initiales, VADIS (Video-Audio Digital Interactive System – Système interactif numérique vidéo-audio). Le mot «interactif» rend compte de la tendance du projet à fournir de nouveaux genres de services audiovisuels et aussi à offrir une meilleure qualité d'image et davantage de programmes de télévision diffusés.

VADIS apportera une importante contribution aux activités de normalisation internationales comme celles que poursuit actuellement le MPEG de l'ISO.

Du point de vue de la souplesse et de la qualité, la télévision numérique est très avantageuse mais, sous sa forme brute, elle occupe une bande beaucoup plus large que les signaux analogiques actuels. Le projet mettra au point des techniques de codage perfectionnées qui comprimeront les signaux numériques de télévision dans un rapport de l'ordre de 20 à 40, tout en conservant pratiquement leur qualité d'origine. Grâce à cette compression on pourra, sous forme numérique, stocker les services audiovisuels numériques et les transmettre par les réseaux de télécommunication, les canaux en bandes d'ondes métriques et décimétriques et les satellites.

Le projet a abordé sa mission sous un angle «générique», c'est-à-dire qu'il recherche une solution qui puisse servir à toutes sortes d'applications. Les premières études se feront par simulation sur ordinateur; les essais en vraie grandeur au moyen de dispositifs expérimentaux sont prévus pour 1993.

Dans ce projet on a prévu cinq tâches:

- besoins, la fonction de ce Groupe de travail est de définir les exigences des applications que doit considérer le projet VADIS;
- algorithmes;
- aspects système, le principal objectif de ce Groupe de travail étant de définir une méthode de multiplexage de la vidéo, de plusieurs sons et autres trains de données en un seul train binaire, tout en conservant le synchronisme son-image;
- démonstrations VLSI; et
- essais en vraie grandeur à effectuer sur le terrain en 1993 au moyen de prototypes de laboratoire.

2.2.4 *Projet européen RACE 813 (codage de canal et modulation)*

Dans le domaine de la radiodiffusion télévisuelle numérique, compte tenu de la situation particulière à l'Europe où une coordination rigoureuse des fréquences revêt une importance particulière, il faut procéder à des études spécifiques de faisabilité de la radiodiffusion de Terre numérique et les principaux radiodiffuseurs et constructeurs d'équipement grand public européens préparent un projet à cet effet; certains participants à ce projet ont déjà fait quelques réalisations et investissements dans ce domaine et une coordination structurée est donc nécessaire.

Ce projet a pour but essentiel d'établir une norme européenne et d'élaborer les technologies correspondantes en vue d'un service de radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre. Il faut que la stratégie générale de mise en œuvre de ce service soit élaborée par un Groupe stratégique européen, lui aussi en cours de formation, qui rassemble les constructeurs, les radiodiffuseurs et l'UER.

Le projet sera principalement consacré à la modulation et au codage de canal et aux aspects système de la radiodiffusion; il recouvre les domaines suivants.

En premier lieu, une vaste étude de tous les débits de données possibles sur les canaux de Terre en bandes d'ondes métriques et décimétriques actuels pour déterminer quels services et produits de radiodiffusion télévisuelle numérique sont réalisables. Cette étude vise à garantir que toutes les options futures possibles ont été prises en compte, par exemple, davantage de canaux de télévision ou une image de meilleure qualité.

En second lieu, en guise de premier pas vers la définition d'un service ou d'un produit, on réalisera des équipements de démonstrations de programmes de télévision diffusés à destination de récepteurs portatifs, c'est-à-dire non reliés au réseau électrique, ou mobiles. Ces démonstrations permettront d'étudier la configuration des réseaux, les extensions éventuelles de futurs services, les attributions de fréquences, les composants, l'objectif étant d'offrir un service de meilleure qualité que les systèmes PAL et SECAM actuels et la possibilité du format 16:9.

Le projet concerne surtout la radiodiffusion télévisuelle dans les canaux en bandes d'ondes métriques et décimétriques, mais il ne faut pas perdre de vue qu'il s'étendra à d'autres supports à bande passante limitée. Dans ce projet, on a prévu sept tâches: gestion et coordination, aspects système et besoins, codage de canal et modulation, constitution du multiplex et aspects réseau, essais et mesures, mise au point des démonstrateurs et des circuits intégrés.

On suppose que le format des signaux vidéo et son codés sous forme numérique sera mis au point et défini dans le cadre d'un autre projet ou par d'autres groupes. C'est pourquoi ce projet évalue la qualité surtout du point de vue des débits de données et des taux d'erreur de transmission.

Entre autres conditions imposées, il faut que le multiplex numérique soit assez souple pour se prêter à diverses applications ou configurations des services et à des modifications ultérieures. Sa conception doit permettre que son extension à la télévision à haute définition puisse se faire de façon compatible. Cette activité fait intervenir 22 participants de 7 pays.

3. Réalisations nouvelles en Amérique du Nord

3.1 Introduction

Les Etats-Unis d'Amérique et le Canada se préparent à choisir une norme qu'utiliseront les radiodiffuseurs de Terre pour assurer un service de télévision évolué. Ces deux pays collaborent à un important et vaste programme d'essais qui se poursuivra jusqu'à l'été 1992.

Aux Etats-Unis d'Amérique, la Commission fédérale des communications (FCC) a institué une Commission consultative pour le service de télévision évoluée (ACATS) en vue de mettre au point une documentation technique sur les systèmes proposés et formuler des recommandations à l'intention de la FCC. Cette dernière est censée faire un choix définitif au cours du second semestre 1993.

Elle a décidé que la TVHD devrait tenir dans les canaux de 6 MHz de la télévision conventionnelle actuelle en bandes d'ondes métriques et décimétriques. Ainsi, dans les bandes de la télévision, il y aura des brouillages entre canaux de télévision conventionnelle et les canaux de TVHD supplémentaires.

En juin 1990, le premier système de radiodiffusion de TVHD de Terre tout numérique a été proposé et soumis à l'examen de la FCC comme norme possible pour les Etats-Unis d'Amérique. Depuis, trois autres systèmes entièrement numériques ont été mis au point et soumis à l'étude. Le § 3.6.2 indique les caractéristiques de quatre systèmes actuellement proposés.

On estime qu'avec un système entièrement numérique on aura vraiment la qualité haute définition sans dégradation perceptible due au bruit ou aux brouillages dans les limites d'une zone de couverture équivalente à celle que donne le NTSC. Il faudra une puissance d'émission plus faible et le signal sera facile à chiffrer.

3.2 Codage à la source

3.2.1 Introduction

Les derniers circuits VLSI mis au point ont largement contribué à l'avènement rapide des techniques de compression numérique de l'image appliquées à la TVHD. La diffusion sur antenne des techniques de télévision évoluées a fait des progrès notables. La compression numérique de la TVHD a pour but essentiel de réduire le débit binaire, tout en conservant une image de qualité acceptable. On a mis au point de nombreuses techniques de compression de la largeur de bande comme la modulation par impulsions et codage différentiel (MICD), le codage en sous-bandes, y compris le codage par transformation, la quantification vectorielle, le codage hybride et des versions adaptatives de ces techniques pour répondre au développement des méthodes de traitement de l'image. Ces techniques tirent généralement parti de la redondance tant psychophysique que statistique des données d'image pour réduire le débit binaire. Ce paragraphe présente quelques-unes des techniques de compression numérique de la TVHD qu'emploient les systèmes proposés aux Etats-Unis d'Amérique.

La représentation d'une image au moyen d'un nombre de bits aussi faible que possible, avec maintien de la qualité et de l'intelligibilité qu'exige l'application considérée est le but principal du codage à la source. Il s'agit d'un codage par prédiction et compensation du mouvement, transformation, quantification et codage entropique. De ce processus appliqué au signal de la source d'image il résulte des pertes, c'est-à-dire que certaines informations de l'image sont perdues. Chacune de ces opérations exploite la redondance que présente l'image à la source et les limitations de l'appareil de visualisation et de l'œil humain. Parmi les codages à la source d'images mobiles on peut distinguer le codage intratrame ou intra-image et le codage intertrame ou interimage*.

3.2.2 Codage intra-image

On peut considérer que le signal vidéo est une suite d'images qui sont chacune un rectangle de pixels. Le codage intra-image code chaque image de télévision à partir des informations qui se trouvent dans cette seule et même image. Il ne fait qu'éliminer la redondance spatiale dans une image. Il existe trois méthodes de codage très répandues du type intra-image: ce sont le codage par prédiction, par transformation et la quantification vectorielle.

Un type très commun de codage par prédiction est la MICD. La prédiction de l'intensité du pixel considéré s'y obtient à partir de celle d'un ou plusieurs pixels codés précédemment. On peut rendre les mécanismes MICD adaptatifs par prédiction ou quantification. Par rapport au codage par transformation, la MICD a surtout l'avantage de sa simplicité. De plus, aux faibles rapports de compression, la réduction de débit binaire qu'on obtient par codage du signal est comparable à celle du codage par transformation. C'est le cas des applications en studio de la TVHD où l'on exige une image de haute qualité.

Avec le codage par transformation, une image est transposée dans un domaine nettement différent de celui de l'intensité d'image et les coefficients transformés sont alors codés. Les techniques de codage par transformation ont pour but de mieux réduire la corrélation qui existe entre intensités de pixels que ne le font celles de codage du signal. Une fois la corrélation réduite, il n'est pas nécessaire de coder plusieurs fois les informations redondantes. Le codage par transformation exploite aussi la particularité des images courantes à savoir qu'une grande partie de leur énergie est concentrée dans une faible proportion des coefficients transformés. C'est ce qu'on appelle la propriété de concentration de l'énergie. Grâce à elle, il est possible de ne coder qu'une partie des coefficients transformés sans affecter sérieusement l'image. Il est aussi souhaitable que la transformation réduise la corrélation entre coefficients transformés; cette propriété est appelée réduction de la corrélation. En choisissant judicieusement la fonction de base, on peut diminuer la corrélation entre coefficients. La transformation en cosinus discrète (TCD) est un exemple de transformation qui est très couramment utilisée pour le codage de l'image. Avec la TCD l'image est divisée en nombreuses sous-images ou blocs (très souvent, 8 sur 8 pixels) et chaque bloc est codé séparément. Comme il code une sous-image à la fois, le codeur peut s'adapter aux caractéristiques locales de l'image. On peut, par exemple, choisir des méthodes distinctes de quantification et d'attribution des bits pour les arrière-plans uniformes et les contours. Pour tirer parti de la propriété de concentration de l'énergie, on utilise couramment deux méthodes pour déterminer les coefficients de la transformation à coder; ce sont le codage par zone et le codage avec seuil. Dans le codage par zone, seuls les coefficients d'une région donnée sont codés. Pour le codage avec seuil, les coefficients de la transformation sont comparés à un seuil et ceux qui se situent au-dessus sont codés. Le choix des coefficients transformés à coder dépend des caractéristiques locales de l'image et peut s'effectuer en fonction de l'état de la mémoire tampon.

Les transformations en sous-bandes sont en général calculées par convolution du signal d'entrée avec un jeu de filtres passe-bande et en décimant (sous-échantillonnant) les résultats. Chaque signal de sous-bande décimé code une portion particulière du spectre des fréquences, ce qui correspond à l'information présente à une échelle spatiale particulière. Un algorithme d'attribution adaptative des bits qui les répartit entre les sous-bandes rend le codage en sous-bandes intéressant pour toutes sortes d'images.

Dans la quantification vectorielle, on traite une large gamme d'images afin d'obtenir un nombre fini de vecteurs d'image (blocs de l'image analogues à ceux du codage par transformation). Grâce à un choix judicieux, ce jeu de vecteurs peut servir à reconstituer les images originales avec une dégradation minimale. On peut considérer, par exemple, que le codage par transformation produit des vecteurs qu'on peut représenter par des cosinus d'ordre faible. Dans la quantification vectorielle, les images à transmettre sont traduites en vecteurs et l'on explore le jeu de vecteurs (ou liste de codes) pour l'apparier convenablement à chaque vecteur de la source. On obtient une compression en

* Selon qu'on utilise un balayage entrelacé ou progressif la terminologie n'est pas la même. La présente Annexe ignore ces distinctions et n'utilise que les mots intra-image et interimage.

transmettant l'adresse du vecteur plutôt que les données d'image. Ce n'est que récemment, grâce à l'exploration de longues listes de codes, que l'on s'est rendu compte que la quantification vectorielle était une technique efficace pour coder les images.

Afin d'améliorer encore l'efficacité du codage, on a recours à un codage entropique à longueur variable qu'effectue le codeur du multiplex vidéo situé juste en aval du codeur de source. Le train binaire que donne le codage ci-dessus n'a pas un débit binaire constant; l'importance de la réduction du nombre de données dépend de l'efficacité du codage. Toutefois, la transmission exige un débit binaire constant. La sortie du codeur du multiplex vidéo est donc envoyée dans une mémoire tampon qui maintient constant le débit des informations vidéo en agissant sur la quantification, pour ne citer que cette caractéristique.

Le codage TCD est mis en œuvre dans les systèmes DigiCipher, DSC-TVHD (DSC: Digital spectrum compatible – TVHD: numérique compatible avec le spectre) et ADTV. Le codage en sous-bandes est utilisé par le système ATVA-P (American Television Alliance-Progressive).

3.2.3 Codage interimage

Tous les systèmes de radiodiffusion de TVHD numérique de Terre proposés font appel au codage interimage pour obtenir, moyennant une réduction de la redondance temporelle entre images, un taux de compression plus élevé que celui que permet le codage intra-image. Pour réduire la redondance temporelle entre images, on code le différentiel de l'image en cours et de sa prédiction. L'image prédite est généralement tirée d'une image précédente ou suivante. La compensation/prédiction du mouvement sert à estimer l'image en cours afin que le différentiel soit aussi petit que possible. L'information de mouvement fait partie de l'information nécessaire à la reconstitution de l'image et il faut la coder et la transmettre de façon appropriée.

Toutes les méthodes de codage mentionnées ci-dessus peuvent servir à coder les images résiduelles. L'information d'image codée ainsi que l'information de mouvement sont de nouveau comprimées au moyen d'un codage à longueur variable en vue d'un rendement maximal. Comme pour le codage intra-image, on peut obtenir un débit constant à l'aide d'une mémoire tampon.

On peut, en gros, distinguer deux méthodes de prédiction du mouvement, soit les méthodes d'appariement de blocs et celles de contraintes spatio-temporelles. Les premières considèrent une petite zone de l'image et recherchent le déplacement qui réussira le «meilleur appariement» avec une des régions possibles d'une image adjacente. Les algorithmes des méthodes de contraintes spatio-temporelles sont fondés sur la formule de la contrainte spatio-temporelle.

Les méthodes d'appariement de blocs sont mises en œuvre dans les systèmes DigiCipher, DSC-TVHD et ADTV et celles de contrainte spatio-temporelle dans le système ATVA-P.

3.2.4 Quantification

L'assignation à quantité scalaire spécifique continue d'un des nombreux niveaux discrets s'appelle quantification. Si chaque scalaire est quantifié indépendamment, le processus s'appelle quantification scalaire. Si deux scalaires ou davantage sont quantifiés ensemble, le processus s'appelle quantification vectorielle (QV). La quantification vectorielle a le grand avantage de pouvoir exploiter la dépendance statistique mutuelle entre les scalaires du bloc. La quantification vectorielle est mise en œuvre dans le système DSC-TVHD pour représenter les combinaisons possibles ou les structures des quantificateurs qu'on peut appliquer à un bloc de coefficients donnés.

Dans tous les systèmes proposés, on se sert de la quantification adaptative pour optimiser le codage de source.

3.2.5 Codage entropique

Statistiquement, certaines valeurs apparaissent plus souvent que d'autres. Il est possible d'assigner des mots de code plus courts aux valeurs les plus fréquentes et des mots longs aux valeurs qui se produisent plus rarement. La théorie de l'information enseigne que l'entropie est le débit binaire moyen théoriquement le plus faible possible nécessaire pour coder un message. Le codage de Huffman (codage à longueur variable) est une excellente méthode de création des mots de code, facile à utiliser, décodable sans ambiguïté et qui aboutit au plus faible débit binaire moyen. De même, quand les coefficients de transformation ou de sous-bande sont convenablement explorés, ils ont tendance à se classer par amplitudes décroissantes et il en résulte qu'en principe les coefficients zéro se groupent en une longue séquence unique qu'on peut coder au moyen d'un mot de code court.

Tous les systèmes proposés pour la TVHD numérique utilisent le codage entropique pour coder les coefficients de l'image elle-même et les informations auxiliaires associées à l'image.

3.2.6 Mémoire tampon

En raison du codage entropique (à longueur variable) et de la quantification adaptative, le débit des données issues du codage à la source varie d'un moment à l'autre. Pour transformer, en vue de la transmission, le débit binaire d'entrée variable en un débit de sortie constant on se sert d'une mémoire tampon. L'état de cette mémoire est calculé périodiquement et renvoyé pour ajuster le niveau de quantification.

Tous les systèmes proposés pour la TVHD numérique recourent aux mémoires tampon.

3.3 Codage de canal

3.3.1 Introduction

Afin d'émettre le signal de TVHD dans 6 MHz, les quatre propositions pour la TVHD aux Etats-Unis d'Amérique comportent une réduction du débit binaire vidéo de la TVHD à 15-17 Mbit/s, soit une compression dans un rapport 60 à 70. Cette forte compression implique le recours au codage du canal pour éviter les blocs erronés et la propagation d'erreurs sur plusieurs images. Pour le haut rendement dans l'utilisation du canal qu'exige la limitation à 6 MHz, il faut égaliser convenablement le canal et réduire sérieusement les signaux brouilleurs et les trajets multiples. Le canal de télévision de Terre est un support très critique comme en témoignent les défauts de transmission de la télévision conventionnelle comme le bruit, les échos, les brouillages et les distorsions de fréquence. Les systèmes de TVHD numériques proposés actuellement utilisent le codage de canal pour protéger les données qui doivent être reçues correctement. Les techniques de codage de canal qui servent à réduire le nombre d'erreurs comprennent l'entrelacement des données, la détection des erreurs et le remplacement ainsi que la correction des erreurs à divers niveaux de protection pour des bits et des blocs d'importance inégale.

3.3.2 Multiplexage de l'image, du son et des données

Dans les différentes propositions, le débit effectif des données d'information va de 15 à 17 Mbit/s pour l'image (selon le mode de transmission), de 0,5 Mbit/s pour le son et de 250 à 550 kbit/s pour les données. Les données numériques sont embrouillées de telle sorte que l'égaliseur du récepteur fonctionne correctement et qu'un signal brouilleur analogue à un bruit soit produit. Certaines propositions comprennent l'entrelacement des données afin que les codecs à correction d'erreur directe puissent traiter les paquets d'erreurs binaires du canal comme des erreurs binaires non corrélées. Les propositions de TVHD numériques présentent divers niveaux de nombre de bits vidéo, audio ou de données par image, superimage ou sous-image. Des séquences de bits de synchronisation sont insérées de temps à autre pour repérer ces limites et fournir au processeur les trains de données vidéo, audio, de texte ou données et de contrôle appropriés.

3.3.2.1 Système DigiCipher

En amont de la correction d'erreur directe au codeur, la durée des lignes de chaque paire de lignes vidéo comprend 848 bits d'information en mode MAQ-16 et 1 160 en mode MAQ-32. La paire de lignes 1-2 contient 8 bits pour le contrôle d'accès, 8 pour les données auxiliaires, 32 pour le son, 24 pour la synchronisation, 40 pour le système de contrôle et le reste pour la vidéo. Les paires de lignes 3-4 à 1049-1050 contiennent 8 bits pour le contrôle d'accès, 8 bits pour les données auxiliaires, 32 pour le son et le reste pour la vidéo. Avant correction des erreurs, le débit total des données est de 13,34 Mbit/s pour le mode MAQ-16 et 18,22 Mbit/s pour MAQ-32.

3.3.2.2 Système de DSC-TVHD

Le signal DSC-TVHD est codé sous forme d'un signal numérique avec un débit qui peut atteindre 21,0 Mbit/s ou 2,69 Mbit/s.

Les octets de transmission sont disposés en «trame de données» qui coïncident dans le temps avec une image NTSC. Une trame de données comprend deux «champs de données» et elle est divisée en 525 «segments de données», le tout en correspondance avec l'«image», la «trame» et la ligne horizontale NTSC, respectivement. (Ces nouveaux termes pour le signal transmis évitent la confusion avec les termes «image», «trame» et «ligne» relatifs aux sources et visualisation du signal.)

Un segment de données comprend 171 octets dont quatre sont des octets de synchronisation. Le premier des quatre sert à synchroniser l'horloge des données vidéo dans le récepteur. Chaque champ de données est précédé d'un signal de synchronisation de champ de données d'une durée égale à celle d'un segment de données consistant en séquences de données pseudo-aléatoires. Ce signal sert à la synchronisation de champ mais joue aussi le rôle de signal de mise en condition du supprimeur d'images fantômes/égaliseur de canal du récepteur. Le reste du champ de données est occupé par les données de programme et de service auxquelles sont ajoutés des octets Reed-Solomon pour correction d'erreur directe. Les bits de synchronisation ne sont pas protégés par le code R-S mais contiennent leur

propre protection par redondance. L'attribution des bits est la suivante: vidéo à 8,6-17,1 Mbit/s, audio à 0,5, données auxiliaires à 0,413, protection Reed-Solomon à 1,3-2,4, synchronisation à 0,292-0,544 et non assignés à 0,04, soit au total 11,1 à 21,0 Mbit/s.

3.3.2.3 Système ADTV

Fondée sur un relais par cellules, la couche de transport de données de l'ADTV donne la priorité à l'acheminement de données vidéo, ce qui rend progressive la dégradation du service lorsque l'état du canal se détériore. Le relais par cellule assure la synchronisation logique qui est indispensable, en présence d'erreurs de transmission, à un acheminement de la vidéo comprimée codée à longueur variable. Le protocole de transport de données de l'ADTV procure aussi un service souple qui permet une combinaison de services vidéo, audio et de données auxiliaires. Le système attribue 14,98 Mbit/s à la vidéo, 512 kbit/s au son, 40 kbit/s aux données et jusqu'à 512 kbit/s aux données auxiliaires. Toutefois, le multiplexage de la vidéo, du son et des données de l'ADTV est souple et la capacité totale peut être répartie entre eux comme on le veut.

L'attribution de priorité identifie les informations qui sont les plus critiques en raison du «type» d'élément de données (les éléments de données vidéo comprennent l'information de mouvement, du type de bloc, des coefficients de la TCD, des paramètres de quantification, etc.). Le processeur de priorité assigne diverses priorités à chaque élément de données en fonction d'une règle d'assignation. L'assignation est effectuée de façon dynamique et reflète toutes les variations de la charge du canal. Cette dernière varie en général d'un moment à l'autre car le débit de sortie des données vidéo comprimées est variable.

Sur un canal de diffusion simultanée, on a mis au point une structure de transport, précisément pour traiter l'information selon diverses exigences de protection contre les erreurs. L'encapsulation des données en vue d'un transport avec priorités est conçu pour assurer l'enchaînement des charges utiles et la possibilité de segmentation afin de tirer le maximum du canal et de réduire l'influence des pertes de charge utile sur le système. Le processeur de transport multiplexe de façon asynchrone les données de la charge utile avec diverses priorités pour former des unités de transport de base appelées cellules. Une cellule ressemble au paquet de données des réseaux classiques à paquets des télécommunications de données modernes. Elle a un en-tête et une fin qui encadrent la zone de charge utile. Chaque cellule a une dimension fixe et ses propres bits de contrôle des erreurs. On notera que le format des cellules de l'ADTV est facile à transcoder sur un RNIS-LB (réseau numérique à intégration de services à bande large), ce qui ménage un acheminement de futurs services d'information.

3.3.2.4 Système ATVA-P

L'information numérique vidéo à 15,64 Mbit/s est multiplexée avec 4 canaux numériques audio occupant 0,5 Mbit/s, un train de données auxiliaire de 0,126 Mbit/s et un contrôle d'accès de 0,126 Mbit/s pour former, avec adjonction de la correction des erreurs, un train composite numérique de 19,43 Mbit/s. Le train de données auxiliaire est disponible pour la transmission de sous-titres ou d'autres données numériques. On insère des bits de synchronisation dans le train binaire transmis pour indiquer les limites de trame. Ces séquences binaires servent au récepteur pour constituer la synchronisation de trame. Le codeur code une trame à la fois. Dans chaque trame les données numériques sont transmises dans l'ordre suivant: synchronisation de trame, vecteurs de mouvement, voies son, données auxiliaires, coefficients vidéo et de modulation. Cette structure de trame de base se répète à chaque trame.

Avant la transmission, les données numériques sont traitées par un embrouilleur de séquence qui rend aléatoires les bits transmis. Celui-ci agit comme un générateur linéaire récursif de polynôme générateur $1 + \chi^{-18} + \chi^{-23}$. La randomisation est appliquée aux données numériques pour garantir que la séquence des bits transmis est suffisamment aléatoire pour que l'égaliseur adaptatif du récepteur reste convenablement convergent pendant les périodes de repos de la transmission.

3.3.3 Protection contre les erreurs

Outre la détection d'erreurs que comprennent les codes cycliques que mettent en œuvre certains systèmes, tous les systèmes ont une correction d'erreurs directe (CED). Tous les systèmes proposés ont un codage CED Reed-Solomon. Les codes Reed-Solomon sont une des familles de codes en bloc connus pour leurs grandes possibilités de correction des erreurs. Un code Reed-Solomon à longueur de bloc N , K bits de données et une capacité d'au plus T de corriger les erreurs peut se définir par un débit K/N ($t = T$).

Le système DigiCipher met en œuvre un codage Reed-Solomon de taux 106/116 ($t = 5$) pour la MAQ-16 et 145/155 ($t = 5$) pour la MAQ-32, en plus d'un codage en treillis de débit 3/4 pour la MAQ-16 et 4/5 pour la MAQ-32. Le seuil du système se situe à un C/N de 12,5 dB en MAQ-16 et 16,5 dB en MAQ-32, y compris une marge de fonctionnement de 2,5 dB. Les données pour correction des erreurs correspondent à 6,17 Mbit/s.

Dans le système DSC-TVHD, un segment de données comprend au total 171 octets de données. Comme quatre d'entre eux servent à la synchronisation, il en reste 167 pour les informations et le contrôle des erreurs. Vingt octets sont réservés au codage Reed-Solomon au taux 147/167 ($t = 10$). On peut ainsi corriger au maximum dix erreurs par segment de données, soit exactement la moitié du nombre d'octets de parité. Le seuil où les erreurs deviennent visibles est atteint pour un rapport signal/bruit de 16 dB dans le cas des données à 4 niveaux et 10 dB dans le cas des données à 2 niveaux. La synchronisation (verticale) du «champ de données» consiste en une séquence de données pseudo-aléatoires d'une durée égale à celle d'un «segment de données» (ligne horizontale) et sert aussi de référence au supprimeur d'images fantômes/égaliseur de canal du récepteur.

Le système ADTV applique un codage Reed-Solomon aux octets de données. Selon la priorité, les données subissent une CED variable. De plus, les opérations de codage du canal comprennent un entrelacement des octets de données. Cela garantit que les salves d'erreurs sur le canal peuvent être traitées comme des erreurs binaires aléatoires non corrélées que les codes Reed-Solomon peuvent souvent corriger.

Le système ATVA-P se fonde sur le codage Reed-Solomon au taux 130/154 ($t = 12$) pour corriger les erreurs de transmission. Le seuil du système se produit pour un C/N de 19 dB, y compris une marge de fonctionnement de 2,5 dB. Pour un C/N de 19 dB, il y a une non-détection d'erreur par jour. Les données pour correction des erreurs correspondent à 3,59 Mbit/s. La propagation des erreurs se limite à un bloc et le système est capable de récupérer sa synchronisation à chaque trame.

3.4 Modulation

3.4.1 Introduction

On sait depuis longtemps que la transmission de données sous forme numérique est plus avantageuse que sous forme analogique. En transmission numérique, ce n'est que lorsque le bruit est assez fort pour changer les zéros en uns et vice-versa qu'il affecte l'acheminement. On dispose à présent de techniques de correction d'erreur directe très efficaces pour éviter que le signal ne soit détérioré par les erreurs occasionnelles que provoquent des niveaux modérés de bruit. Toutefois, le système de transmission numérique doit s'accommoder des forts débits de données que crée le codage numérique. Un signal de télévision à haute définition numérisé à 8 bits par échantillon engendre un train de données à environ 1 Gbit/s. La compression numérique (codage à la source) envisagée aux Etats-Unis d'Amérique ramène le débit de données à environ 17 Mbit/s, soit un facteur de réduction d'environ 60. Pour obtenir cette compression on ne disposait pas, il y a seulement quelques années, de la technologie nécessaire.

3.4.2 Méthodes de modulation numérique

La modulation numérique est un sous-produit des méthodes de modulation analogiques plus familières comme la modulation d'amplitude, de fréquence et de phase. Les techniques de modulation numériques ont tout d'abord été mises au point pour les modems téléphoniques et la transmission de données par satellite. Bien que dans ces deux cas les largeurs de bande aillent de la bande sonore à des dizaines de MHz, la même théorie s'applique. Le débit de données élevé qu'exige la TVHD, soit environ 20 Mbit/s après compression et correction des erreurs et la nécessité de confiner le spectre rayonné dans un canal de télévision de 6 MHz imposent d'utiliser au mieux ce canal.

3.4.2.1 Modulation d'amplitude en quadrature (MAQ)

Trois des quatre systèmes numériques proposés, DigiCipher, ADTV et ATVA-P ont recours à la MAQ. La MAQ-16 est une forme numérique de modulation d'amplitude en quadrature qui transmet quatre bits par symbole (4 bit/Hz). Le train de données à environ 20 Mbit/s est d'abord converti en mots de 4 bits appelés symboles. Le «16» dans le sigle provient du fait qu'il y a 16 symboles différents possibles. Le débit des symboles est évidemment un quart du débit binaire d'origine, soit environ 5 Msymbole/s. Un simple convertisseur N-A convertit une des paires de bits du symbole en un signal à 4 niveaux qui est envoyé à un modulateur symétrique qui module une porteuse d'entrée RF (ou FI). L'autre paire de bits du symbole est convertie de même en un signal à quatre niveaux, envoyé à un second modulateur symétrique qui fonctionne en quadrature avec l'autre, c'est-à-dire avec une porteuse déphasée de 90°. Les deux sorties des modulateurs symétriques sont combinées pour produire le signal MAQ-16 centré sur la porteuse (ou sur la fréquence intermédiaire). Ce signal de sortie sera alors transposé sur la fréquence d'émission.

Le récepteur comprend aussi une paire de modulateurs symétriques pilotés à 90° l'un de l'autre par un oscillateur local (OL). L'OL doit être verrouillé en phase sur la porteuse d'origine de l'émetteur. Dans le récepteur, la phase de la porteuse se déduit des données à l'aide d'un processus complexe qui met en jeu des boucles à verrouillage de phase et qui ne sera pas exposé ici. Les sorties des modulateurs symétriques ne sont pas des signaux carrés mais des

versions arrondies des signaux de modulation carrés à 4 niveaux en raison du filtrage exigé par la largeur de bande limitée du canal. Dans le récepteur MAQ-16, le signal en phase et le signal en quadrature, qui ont tous deux 4 niveaux, sont chacun reconvertis sous forme numérique à 2 bits au moyen d'une paire de convertisseurs A-N. Les deux paires de bits obtenues sont alors multiplexées pour reconstituer le train de données d'origine à 20 Mbit/s.

3.4.2.2 Spectre radioélectrique

Pour évaluer la largeur de bande du signal émis, considérons le signal de modulation le plus complexe possible à l'entrée d'un des modulateurs symétriques. Ce serait un train de données à 5 Mbit/s avec alternances entre zéro et un, c'est-à-dire un signal carré à 2,5 MHz. En limitant la bande du signal juste au-dessus de 2,5 MHz, la sortie du modulateur symétrique aura 5 MHz de large, juste ce qu'il faut pour tenir dans un canal de 6 MHz avec des bandes de garde de 0,5 MHz. Nous pouvons aussi ne pas filtrer le signal modulant à 4 niveaux et filtrer le canal à 6 MHz, avec le même résultat. En raison de l'alternance du signal de données l'énergie RF est concentrée à deux fréquences distantes de 5 MHz, près des bandes de garde. Dans le cas de données réelles, il y a aussi des fréquences de modulation plus basses et l'énergie charge tout le canal.

A cause du codage à la source et de canal, les données de modulation apparaissent sous forme aléatoire, même si la vidéo ne l'est pas. L'énergie est donc étalée sur toute la bande de 6 MHz, comme si c'était du bruit filtré. Ce genre de signaux résiste très bien au brouillage dans le même canal, précisément pour les raisons qui rendent la technologie d'étalement du spectre intéressante. Comme il n'y a pas de porteuses discrètes, ce signal brouille plutôt moins les autres signaux que des signaux NTSC, PAL ou SECAM de puissance équivalente. En outre, on estime que, comme les émissions numériques n'ont pas besoin d'un rapport signal/bruit aussi élevé, on pourra réduire la puissance d'émission. Il s'ensuit qu'on peut utiliser les canaux interdits dans les plans d'attribution actuels et on peut ajouter beaucoup de nouveaux canaux numériques de TVHD dans un spectre de télévision qui jusqu'alors paraissait totalement occupé.

3.4.2.3 Modulation à bande latérale résiduelle (BLR)

Un des systèmes proposés, DSC-TVHD, emploie la modulation BLR-4 et BLR-2. La bande latérale résiduelle, qui sert à l'émission du NTSC, est un compromis viable entre la MA à double bande latérale et la MA à bande latérale unique. On ne peut se servir de la bande latérale unique en télévision en raison des problèmes pratiques que pose le filtrage très raide nécessaire aux très basses fréquences alors qu'elle convient très bien pour le son où l'on peut filtrer les fréquences basses. La double bande latérale exige pour la télévision une bande vraiment trop large. La bande latérale résiduelle retient une faible portion de la bande latérale inférieure et toute la bande latérale supérieure. Dans l'émetteur, ou dans le récepteur, un filtrage progressif affaiblit la partie inférieure de la bande pour compenser la présence des deux bandes latérales aux fréquences basses. En télévision analogique BLR, la porteuse n'est pas supprimée.

La BLR ne figure normalement pas parmi les méthodes de modulation numériques et ne s'emploie pas avec une porteuse supprimée. Puisqu'il y est beaucoup plus difficile, en raison du principe de la BLR, de reconstituer une porteuse supprimée qu'en MAQ, il faut une porteuse pilote. Dans la proposition en question, on a choisi la BLR pour pouvoir émettre une porteuse pilote à la fréquence de la porteuse supprimée afin de faciliter l'accord du récepteur sur le canal en présence de bruit. Avec la MAQ, une porteuse pilote se situerait au milieu de la bande de 6 MHz et pourrait brouiller le NTSC. En BLR, la porteuse se trouve près du bord inférieur de la bande, là où les récepteurs NTSC ont leur propre filtre BLR à fort affaiblissement.

Comme la modulation BLR ne transmet qu'une seule bande latérale complète, celle-ci peut occuper la quasi-totalité du canal de 6 MHz. Par rapport à la MAQ, il faut donc doubler le débit des symboles (le taux de modulation) pour tirer le meilleur parti du canal. Comme la BLR ne permet pas d'acheminer un canal en quadrature, la BLR-4 et la MAQ-16 offrent à peu près le même débit de données lorsque l'une et l'autre sont optimisées en fonction du canal, chacune à sa façon.

3.4.2.4 Modulation des systèmes proposés

DigiCipher permet deux modes d'émission, MAQ-32 au débit de 24,39 Mbit/s et MAQ-16 au débit de 19,51 Mbit/s. Le radiodiffuseur a le choix du mode – MAQ-16 a une zone de couverture plus étendue et MAQ-32 offre une meilleure qualité vidéo – et les récepteurs s'adapteront automatiquement au mode émis. On avance que le mode MAQ-32 assure une réception essentiellement exempte d'erreurs pour un rapport porteuse/bruit de 16,5 dB; en MAQ-16, ce seuil est à 12,5 dB. Le débit des symboles est 4,88 Msymbole/s.

DSC-TVHD met en jeu une combinaison de modulations BLR-4 et BLR-2, c'est-à-dire modulation à bande latérale résiduelle à 4 et 2 niveaux. Le débit de symboles est 10,76 Msymbole/s. Certaines données sont transmises à 1 bit/symbole et d'autres à 2 bit/symbole. Il en résulte une gamme de débit de données de 11,1 à 21,0 Mbit/s. Il y a une porteuse pilote et on pense que, grâce à elle, l'acquisition du signal en présence de bruit se fait mieux.

L'ADTV emploie la MAQ-16 au débit de 21 Mbit/s. Le débit des symboles est 5,25 Msymbole/s. On estime que la mise en forme du spectre réduit les brouillages mutuels avec le NTSC.

L'ATVA-P emploie la MAQ-16 au débit de 19,43 Mbit/s. Le débit de symboles est 4,86 Msymbole/s. On fait valoir que la réception est essentiellement exempte d'erreurs, avec une erreur non détectée par jour pour un rapport porteuse/bruit de 19 dB.

3.4.3 *Egalisation du canal*

Le récepteur de TVHD DigiCipher utilise un égaliseur adaptatif à 256 prises pour éviter les distorsions par trajets multiples. Il peut traiter les échos simples ou multiples de -2 à $+24$ μ s.

DSC-TVHD a un supprimeur d'images fantômes/égaliseur de canal automatique. Il peut traiter les images fantômes multiples de -4 à $+20$ μ s.

L'ADTV comprend un égaliseur de canal adaptatif pour lutter contre les effets de la propagation par trajets multiples et les images fantômes. Il est conçu pour fonctionner jusqu'à 16 μ s ou par extension jusqu'à 40 μ s.

L'ATVA-P emploie l'égalisation adaptative pour combattre les réflexions par trajets multiples qu'on observe couramment en radiodiffusion de Terre et les microréflexions qui se produisent sur les câbles de télévision. L'égaliseur supprimera les effets des trajets multiples complexes jusqu'à 2 μ s ainsi que les réflexions uniques sur longs trajets jusqu'à 32 μ s.

3.4.4 *Mise en forme du spectre*

DigiCipher et ATVA-P effectuent la mise en forme du spectre au moyen d'un filtre numérique linéaire en phase et à réponse impulsionnelle finie.

DSC-TVHD met en œuvre dans le codeur un prétraitement à l'usage du filtre de brouillages NTSC du récepteur. Il a aussi une sélectivité oblique, semblable côté bande résiduelle et côté bande haute. La sélectivité oblique est répartie entre l'émetteur et le récepteur, ce qui est censé être ce qu'il y a de mieux pour le rapport signal/bruit. Au moyen de dispersion, on évite que la synchronisation périodique du segment de données ne vienne brouiller le NTSC.

L'ADTV emploie la MAQ à mise en forme du spectre en vue d'une utilisation plus efficace du spectre et d'un fonctionnement plus résistant vis-à-vis du NTSC et moins agressif à son égard.

3.5 *Exploitation du spectre*

3.5.1 *Introduction*

Aux Etats-Unis d'Amérique, on étudie activement l'introduction d'émissions de Terre de signaux de TVHD dans les bandes attribuées en bandes métriques et décimétriques. Ces études montrent qu'on sera peut-être forcé de réduire jusqu'à 160 km la distance dans le même canal si dans une large majorité des émetteurs de Terre existants (plus de 97%) il faut diffuser, en plus de leurs possibilités actuelles en NTSC, un service de TVHD. Les recherches effectuées présentement portent sur la couverture en TVHD et les brouillages dans le même canal acceptables avec ces distances.

Ce paragraphe expose les techniques que l'on envisage d'employer pour savoir si le spectre disponible suffira à assurer ces services supplémentaires. Elles serviront à déterminer s'il faudra maintenir les restrictions imposées actuellement au NTSC en bande décimétrique, à analyser les zones de couverture effectives et à mettre au point des méthodes d'attribution et d'assignation.

3.5.2 *Examen des tabous*

Lorsqu'un plan d'attribution en bande décimétrique a été mis au point aux Etats-Unis d'Amérique au début des années 50, on a interdit certains écarts entre canaux pour tenir compte des limitations imposées à cette époque aux brouillages et valables pour les systèmes d'émission et de réception en NTSC. On les a alors appelées des tabous. Elles sont décrites au § 3.5.5. On a supposé, a priori, que pour disposer d'une place suffisante dans le spectre en bandes

d'ondes métriques et décimétriques pour le nouveau service de TVHD de Terre on pourrait réduire jusqu'à 160 km la distance dans le même canal et s'affranchir des tabous. Dans ces conditions, on pourra trouver une assignation pour pratiquement toutes les stations de radiodiffusion de Terre NTSC (plus de 97% des 1 700 stations existantes). Comme il serait souhaitable de se débarrasser des tabous, il est essentiel de comprendre les mécanismes de brouillage dans les systèmes de TVHD proposés et de savoir si certains canaux ont toujours besoin d'être protégés par ces tabous. On a mis au point un algorithme pour voir ce qu'il adviendrait des plans d'attribution possibles si l'on conservait certains tabous. Les scénarios étudiés sont décrits ci-dessous. Tous les scénarios de plans d'attribution supposent une distance dans le même canal de 160 km. Ils se fondent tous uniquement sur des considérations géométriques (distance dans le même canal de 160 km et restrictions sur les distances) et ne formulent aucune hypothèse sur l'immunité aux brouillages. On notera qu'au § 3.5.5 les tabous sont donnés en fonction de la distance en km, et non du rapport signal utile/signal brouilleur. A part le tabou de l'oscillateur local ($n+7$), on a tenu compte dans l'étude ci-après de tous les autres.

3.5.2.1 Scénario TVHD/NTSC

Le scénario TVHD/NTSC examine les conséquences des tabous tant individuels que multiples sur la disponibilité du spectre en appliquant les restrictions imposées aux distances aussi bien aux stations en NTSC qu'aux nouveaux canaux assignés à la télévision évoluée (TVE). C'est le plus contraignant des trois scénarios.

3.5.2.2 Scénario NTSC

Le scénario NTSC examine le spectre qui est disponible pour la TVHD en n'imposant de restrictions relatives aux distances qu'aux nouveaux canaux de TVHD par rapport aux assignations NTSC existantes. Il suppose que les nouveaux récepteurs de TVHD auront des tolérances de conception et de fabrication qui élimineront pratiquement ces sortes de brouillage pour le nouveau service de TVHD.

3.5.2.3 Scénario de cohabitation avec NTSC

Ce troisième scénario examine le spectre qui est disponible mais n'impose de restrictions relatives aux distances qu'aux assignations NTSC existantes, comme dans le scénario NTSC; toutefois, il admet la cohabitation du canal soumis aux tabous avec le canal NTSC associé. C'est le moins contraignant des scénarios.

Le Tableau 1 montre, pour chacun des trois scénarios, combien d'assignations sont perdues lorsqu'on s'impose diverses combinaisons de tabous.

TABLEAU 1

Résultats pour divers scénarios et tabous

Tabou	Scénario TVHD (1)	Scénario NTSC (1)	Scénario cohabitation avec NTSC (1)
$n \pm 1$	93	63	30
$n \pm 1, +14, +15$	338	156	75
$n + 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$	70	50	3
$n + 4, \pm 7, \pm 8$	19	11	1
$n \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 7, \pm 8$	135	98	11
$n \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 7, \pm 8, +14, +15$	483	304	153

(1) Les valeurs ci-dessus expriment le nombre d'assignations à la TVHD que l'on perd en s'imposant les tabous indiqués, c'est-à-dire le nombre de stations qu'on ne peut implanter.

3.5.2.4 Conclusions

De ces études se dégagent les résultats suivants:

- Si tous les tabous du NTSC sont conservés, tous les titulaires de licence n'auront pas accès à la TVHD; 91% d'entre eux y auront accès avec le troisième scénario et seulement 72% avec le premier.
- Quel que soit le scénario considéré, c'est le tabou canal image ($n + 15$) qui donne les plus mauvais résultats statistiques pour la TVHD, alors que les tabous-batteurs en FI ($n + 4$, ± 7 , ± 8) donnent les meilleurs.
- Sauf pour le tabou canal image ($n + 14$, $n + 15$), la modification des restrictions imposées aux distances a peu d'influence sur les résultats statistiques pour la TVHD.
- La cohabitation exacte des canaux soumis à restriction améliore les résultats statistiques d'implantation de la TVHD. Une cohabitation rapprochée seulement améliore un peu ces résultats pour la TVE dans le cas de tabous canal adjacent et canal image mais elle les améliore nettement pour les autres tabous.

3.5.3 Etude des couvertures et des brouillages

Toute station de radiodiffusion s'intéresse avant tout à sa zone de couverture. A l'origine, le plan d'attribution de fréquences du NTSC a été établi en fonction des limites théoriques du bruit tolérable ou, dans certaines régions où on voulait implanter davantage de stations, des brouillages tolérables. En pratique, les zones de couverture de certaines stations existantes sont encore limitées par les brouillages. On a eu pour objectif d'assurer en TVHD une zone de couverture comparable. On étudie actuellement des techniques d'optimisation de la couverture des services de TVHD. Il serait souhaitable que les stations de TVHD et NTSC qui cohabitent aient la même zone de couverture.

3.5.3.1 Couverture en NTSC

Les emplacements et les attributions de spectre aux stations NTSC ont été définis en fonction des distances de séparation et des limites imposées aux puissances émises et aux hauteurs d'antenne. Les Fig. 1 et 2 indiquent le nombre des stations actuelles en bandes d'ondes métriques et décimétriques dont le service de qualité B est affecté par des stations, respectivement, dans le même canal ou dans un canal adjacent.

3.5.3.2 Zone de service des stations de TVHD

Etant donné qu'il est nécessaire d'avoir des stations de TVHD rapprochées, on s'attend à ce que les brouillages limitent leurs zones de service. La Commission consultative de la FCC met au point deux techniques:

- pour déterminer une zone de service en TVHD équivalente à celle d'une station NTSC, et
- pour pouvoir déterminer la zone de service en fonction des caractéristiques de brouillage des systèmes proposés dont les paramètres sont en cours de définition par le Centre d'essais de la télévision évoluée (ATTC).

L'ATTC mesure les rapports signal utile/signal brouilleur TVHD sur NTSC, NTSC sur TVHD et TVHD sur TVHD. Seront mis au point à partir des rapports signal utile/signal brouilleur ainsi obtenus des modèles en vue d'évaluer les zones de couverture compatibles avec les services de radiodiffusion NTSC actuels.

3.5.3.3 Zone de service effective

La zone de service effective d'une station de télévision est la portion de sa zone de service qui subsiste une fois qu'on en a retiré les contours qui subissent des brouillages dus à d'autres stations.

3.5.3.4 Zone de service pour un système proposé

On élabore actuellement des méthodes permettant de définir la zone de couverture disponible en présence de brouillages par NTSC dans le cas d'un des systèmes proposés. A cet effet, on se sert d'un modèle qui tient compte, pour le système proposé, des seuils de bruit et de brouillage du récepteur mesurés par l'ATTC et en déduit les zones de service et de brouillage.

FIGURE 1

Distribution du nombre de stations dans le même canal qui influencent le service de qualité B des stations NTSC existantes

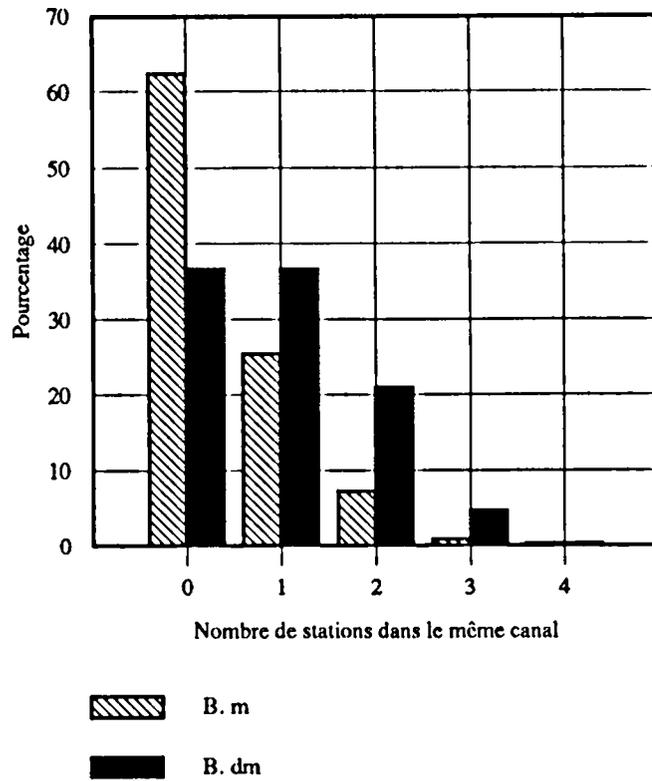
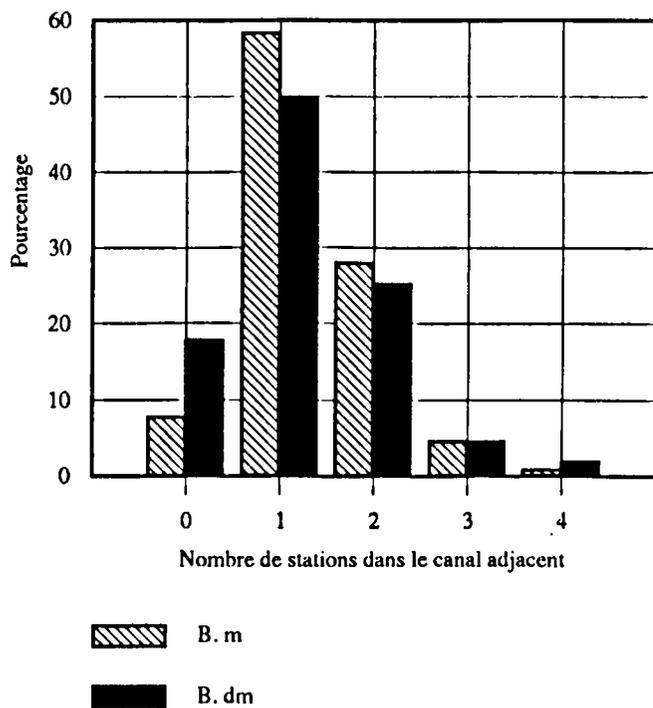


FIGURE 2

Distribution du nombre de stations dans les canaux adjacents qui influencent le service de qualité B des stations NTSC existantes



3.5.4 *Plan d'assignation/allocation*

Pour mettre au point un plan d'allocation pour la TVHD, il faut partir d'un certain nombre d'hypothèses et de principes sur la base desquels on peut établir un tel plan.

3.5.4.1 *Principes*

Les principes que pose la Commission consultative de la FCC comme base d'une planification d'allocation de fréquences à la TVHD sont les suivants:

a) *Apparier les allocations à la TVE avec les allocations actuelles au NTSC*

Il faut trouver un canal TVHD associé à chacune des allocations en bandes d'ondes métriques et décimétriques existantes. Il s'agit là du point de départ fondamental d'un plan pour la TVHD qui sert de base à la mise en œuvre.

b) *Couverture comparable*

Il est souhaitable que le plan d'allocation (quand sa mise en œuvre aboutira à de véritables assignations) soit capable de procurer à toutes les stations NTSC une zone de service TVHD comparable à la zone de service actuelle telle que les brouillages la définissent pour la station avec laquelle elle est appariée.

c) *Utilisation des sites existants*

Dans la mesure du possible, on devrait établir le plan d'assignation en prévoyant d'implanter les émetteurs des signaux de TVHD sur les emplacements des émetteurs existants.

d) *Distances limites*

L'établissement actuel du plan d'allocation est essentiellement fondé sur des distances minimales entre stations dans le même canal.

e) *Modèles d'allocation*

Comme il y a littéralement des milliers de façon d'apparier les allocations TVHD et NTSC, il faut des algorithmes d'optimisation pour déterminer les distributions viables d'allocations.

f) *Spectre tabou*

Les portions de spectre en bandes d'ondes métriques et décimétriques que des tabous interdisent d'attribuer dans les plans d'allocation NTSC dans ces bandes peuvent être utilisés sélectivement si besoin est pour trouver des allocations à la TVHD.

g) *Brouillages TVHD/NTSC*

Le plan de la TVHD doit, entre autres objectifs, réduire au minimum les brouillages créés par une station de TVHD aux dépens de stations NTSC ou d'autres stations de TVHD. L'objectif recherché est que les brouillages prévus ne doivent pas être perçus comme plus gênants que ceux qui sont jugés actuellement acceptables entre stations NTSC.

h) *Gel des caractéristiques des assignations du NTSC*

Afin de connaître les données fréquentielles et spatiales disponibles en vue de la mise au point du plan de la TVHD, à partir d'un certain moment il ne faut plus faire varier certaines des caractéristiques de mise en œuvre des allocations actuelles au NTSC. Autrement dit il faut, à un moment ou à un autre, se décider à geler les emplacements des émetteurs existants. Ainsi, il sera plus facile d'établir les contraintes imposées au développement du plan de la TVHD.

j) *Allocations non utilisées*

On peut avoir besoin du spectre actuellement attribué mais non utilisé pour introduire la TVE sur toutes les stations qui émettent. Ainsi, on utilisera, si besoin est, un nombre minimal de ces allocations. Il faudra en occuper aussi peu que possible, seulement lorsqu'une attribution à une station en fonctionnement serait autrement impossible.

k) *Récepteurs*

On tiendra compte des caractéristiques d'un récepteur de TVHD courant pour déterminer les zones de service homologues limitées par les brouillages. Ces caractéristiques comprendraient celles des antennes comme le rapport avant-arrière et celles des récepteurs comme les possibilités de réjection par le syntoniseur/décodeur.

3.5.4.2 Plan d'allocation/assignation

C'est sur ces principes généraux que repose la mise au point d'un plan d'allocation pour un service de TVHD. Il a pour but de donner au service de TVHD des zones de couverture équivalentes à celles des stations NTSC.

La sélection s'effectue au moyen d'algorithmes d'optimisation qui essaient dans les zones les plus encombrées de combiner les canaux pour trouver des portions de spectre disponibles.

3.5.5 Mécanismes des brouillages qui affectent le NTSC

3.5.5.1 Séparation géographique pour l'intermodulation (canaux $n \pm 2$, $n \pm 3$, $n \pm 4$, $n \pm 5$) = 32,2 km

Le brouillage par intermodulation résulte d'une combinaison de signaux d'entrée dont la somme ou la différence donne des fréquences non essentielles qui tombent dans un intervalle de onze canaux. C'est pourquoi les règles de la Commission interdisent d'implanter une station près de l'autre lorsque leurs canaux diffèrent de 2, 3, 4 ou 5 (le canal adjacent est aussi exclu mais avec des exigences de distance plus sévères).

3.5.5.2 Séparation géographique pour la transmodulation (canaux $n \pm 2$, $n \pm 3$, $n \pm 4$, $n \pm 5$) = 32,2 km

Le brouillage par transmodulation concerne les mêmes canaux que l'intermodulation mais le mécanisme est différent. Dans le brouillage par transmodulation, la modulation du canal brouilleur se superpose à celle du canal utile. Généralement, ce brouillage se manifeste d'abord par l'apparition des bords horizontaux et verticaux du canal brouilleur dans le canal utile.

3.5.5.3 Séparation géographique pour l'oscillateur local (canal $n + 7$) = 95,7 km

L'oscillateur local d'un récepteur de télévision est accordé sur une fréquence qui se situe dans le 7^e canal au-dessus du canal utile afin que le battement tombe dans la bande de fréquences intermédiaires qui s'étend de 41 à 47 MHz. Cet oscillateur local se comporte comme un émetteur de faible puissance. Dans les récepteurs anciens, l'énergie de l'oscillateur local qui s'échappe du syntoniseur pour gagner l'antenne suffit à brouiller un récepteur voisin accordé sur le 7^e canal. C'est pourquoi la FCC a imposé une distance de 95,7 km entre émetteurs dont les canaux diffèrent de 7. Les oscillateurs locaux des récepteurs modernes envoient très peu d'énergie à l'antenne de sorte qu'on estime que ce tabou n'a plus vraiment de raison d'être.

3.5.5.4 Séparation géographique pour le battement FI (canaux $n \pm 7$, $n \pm 8$) = 32,2 km

Lorsque l'écart de fréquence entre deux signaux de niveau élevé tombe dans la bande FI utilisée partout dans les récepteurs NTSC (41 à 47 MHz), il risque de se produire un battement entre eux deux, ce qui créera un signal brouilleur dans les étages FI du récepteur. Ce phénomène se manifeste quand l'écart de fréquence entre stations est de 7 ou 8 canaux.

3.5.5.5 Séparation géographique pour la demi-FI (canal $n + 4$) = 32,2 km

Les signaux qui tombent dans le 4^e canal au-dessus du canal utile risquent de produire un battement avec l'oscillateur local accordé sur le canal utile, ce qui crée un signal à la demi-FI. Le circuit non linéaire du premier détecteur du récepteur peut fabriquer l'harmonique 2 du signal à demi-FI qui va brouiller le canal utile.

3.5.5.6 Séparation géographique pour le canal conjugué (canal $n + 14$) = 95,7 km (canal $n + 15$) = 119,9 km

L'oscillateur local d'un récepteur de télévision est accordé sur une fréquence qui se trouve approximativement à 47 MHz au-dessus du bord inférieur du canal utile. Quand la fréquence de l'oscillateur local et le signal du canal utile rencontrent le premier détecteur du récepteur, le battement par différence tombe dans le canal FI, 41 à 47 MHz. Toutefois, un signal non désiré situé au-dessus de la fréquence de l'oscillateur produit aussi un signal qui tombe dans la bande passante FI du récepteur. Pour la porteuse image, le canal critique est le 15^e au-dessus du canal utile. C'est le 14^e pour la porteuse son.

3.6 Comparaison des systèmes proposés

3.6.1 Essais des systèmes de TVHD numérique de Terre

Pour aider la FCC, l'industrie de la radiodiffusion télévisuelle des Etats-Unis d'Amérique a tout d'abord organisé en 1988 le Centre d'essais de la télévision évoluée (ATTC) auquel s'est jointe en 1989 l'industrie des récepteurs de télévision. L'ATTC, organisme privé sans but lucratif, procède à des essais complets et impartiaux des divers systèmes de TVE qui ont été proposés en guise de norme de télévision de Terre aux Etats-Unis d'Amérique.

Simultanément, l'industrie de la télévision par câble des Etats-Unis d'Amérique a organisé ses propres activités de recherche et développement et a créé, en 1988, les Laboratoires de télévision par câble (CableLabs). Avant que l'ATTC et les CableLabs se soient organisés, les industries de la radiodiffusion et du câble avaient envisagé d'évaluer en commun les systèmes proposés, or en réalité l'ATTC et les CableLabs ont uni leurs efforts et leurs ressources dans les essais. L'ATTC exploite à Alexandria, Virginie, un laboratoire qui examine les réalisations actuelles et qui est capable d'étudier à fond les systèmes proposés pour la radiodiffusion de Terre. Là aussi, CableLabs exploite un laboratoire analogue qui étudie la transmission des systèmes proposés à la fois sur câble et sur fibre optique.

A la même époque, l'industrie canadienne, en liaison avec le Gouvernement du Canada, a créé à Ottawa des installations complémentaires pour essayer tous les systèmes proposés et les soumettre à des essais subjectifs bien calibrés. Tous les essais subjectifs auxquels participent des observateurs non professionnels se dérouleront à Ottawa, au Laboratoire d'évaluation de la télévision évoluée (ATEL). L'ATEL fait partie du Centre de recherche des communications (CRC) du Ministère des Communications du Gouvernement canadien.

Pour le moment, l'ATTC, CableLabs et l'ATEL envisagent d'essayer quatre systèmes numériques. Le Tableau 2 les présente ainsi que le calendrier des essais. Tous les systèmes seront soumis à des essais objectifs et subjectifs.

TABLEAU 2
Systèmes de transmission de TVHD numérique
proposés au Comité consultatif de la FCC*

Nom du système et origine de la proposition (dans l'ordre de la séquence d'essai)	Calendrier des essais (1)
1 DigiCipher General Instrument Corporation/ATVA (2)	14 novembre 1991 au 7 janvier 1992
2 DSC-TVHD: digital spectrum compatible TVHD Zenith Electronics Corporation/AT&T	14 janvier 1992 au 2 mars 1992
3 ADTV: advanced digital television North American Philips/ATRC (3)	9 mars 1992 au 22 avril 1992
4 ATVA-Progressive Massachusetts Institute of Technology/ATVA (2)	29 avril 1992 au 15 juin 1992

* Tiré de données que les auteurs de propositions ont communiquées à l'ATTC.

(1) Calendrier officiel en date du 7 juin 1991.

(2) American Television Alliance (General Instrument, Massachusetts Institute of Technology).

(3) Advanced Television Research Consortium (NBC, North American Philips, David Sarnoff Research Center, Thomson Consumer Electronics).

Ces essais sont conçus pour résoudre les difficultés essentielles que rencontrent la radiodiffusion et la transmission sur câble:

- l'utilisation envisagée des canaux habituels de 6 MHz pour acheminer l'image d'un service de télévision évoluée contenant beaucoup plus d'information;
- avoir un système qui résiste bien aux brouillages et autres défauts de transmission; et
- la possibilité, pour ce système, de coexister avec le service de télévision NTSC actuel.

Etant donné qu'il est essentiel que les estimations soient comparatives, tous les systèmes seront soumis à un programme d'essais commun complété d'essais propres à chaque système afin d'en étudier les particularités individuelles. L'ATTC et CableLabs procéderont à des évaluations de la nature et de la qualité de chaque système dans des conditions de transmission simulées par radiodiffusion et sur câble, respectivement. Avec des «observateurs experts», c'est-à-dire des techniciens de la télévision formés à cette tâche et d'autres chercheurs, on établira, pour chaque système, dans quelle gamme de circonstances un défaut de transmission donné commence à se manifester pour faire finalement disparaître l'image ou la rendre inexploitable. On enregistrera sur bande vidéo numérique et on enverra à ATEL au Canada les signaux obtenus dans ces conditions. C'est dans la gamme définie ci-dessus que ces bandes seront exploitées au Canada lors d'évaluations subjectives de la qualité de chaque système par des observateurs non experts - du Canada et des Etats-Unis d'Amérique. Ces importantes évaluations subjectives se dérouleront selon les techniques traditionnelles que le CCIR a définies et mises en œuvre, auxquelles s'ajoutent d'autres méthodes extrapolées et d'autres encore.

L'étude, tant objective que subjective, de l'aspect son de chaque système sera également entreprise et gérée par l'ATTC.

Pour établir le rapport des essais effectués en laboratoire sur chaque système, on rassemblera les résultats techniques objectifs des travaux d'Alexandria et les évaluations subjectives d'Ottawa. En fait, les travaux canadiens de réexamen des bandes du premier système étudié à Alexandria seront en cours lorsque le deuxième système arrivera à Alexandria où commenceront alors ses essais. Ce processus d'évaluations parallèles selon des procédés et méthodes d'essai conçus et revus à la fois aux Etats-Unis d'Amérique et au Canada représente une collaboration exceptionnelle. Il en résulte une économie de temps et d'argent pour les nombreux chercheurs qui étudient les normes mais aussi pour les créateurs des systèmes proposés. On espère avoir ainsi une comparaison instantanée des systèmes actuels de transmission de télévision fonctionnant en temps réel et avec tout le matériel nécessaire de façon à avoir la meilleure compréhension possible des éléments de choix d'une norme viable.

Ce calendrier prévoit aussi quelques essais en vraie grandeur. Tandis que l'ACATS met au point un planning à cet effet, on espère qu'il démarrera aussitôt que possible pour le ou les systèmes qui, au vu des résultats obtenus en laboratoire, devront faire l'objet d'essais en vraie grandeur. Il est indispensable de se soumettre à cette épreuve dans le «monde réel» avant de pouvoir raisonnablement confirmer une nouvelle norme et la mettre en exploitation.

Les évaluations subjectives traiteront de deux questions importantes: premièrement, les observateurs «non-experts» jugent-ils les brouillages et autres défauts gênants, tolérables ou insignifiants, et dans les mêmes conditions que les experts? Deuxièmement, comment l'observateur moyen situe-t-il la qualité propre des images d'un système donné par rapport à l'image de référence d'excellente qualité? Les évaluations subjectives seront effectuées au moyen de quatorze images statiques photographiques et de dix-huit scènes en mouvement tirées de films ou de vidéos. Chaque scène, fixe ou non, a été conçue par un groupe de spécialistes de l'ACATS. Sous la direction attentive de psychophysiologistes, le groupe a défini des images d'essai spéciales qui ne diffèrent pas de ce que l'on voit normalement à la télévision mais qui sont choisies pour mettre en évidence l'élément qu'on se propose d'y étudier au cours d'un essai comme la résolution, le rendu du mouvement, la qualité de la luminance et de la chrominance, etc.

Les images statiques ont toutes été transposées dans les modes de balayage du système à l'étude au moyen d'un matériel commercial de traitement d'images numériques modifié à cet effet. Les séquences avec mouvement obtenues à partir de sources vidéo ont été produites conformément aux exigences de l'ACATS; chaque scène a été tournée dans chacun des quatre modes de balayage que spécifiaient les auteurs de propositions, plus le NTSC. Comme il n'existe pas de magnétoscopes numériques aux formats 1050 lignes entrelacées et 787,5 lignes progressives, il a fallu trouver une solution pour enregistrer les signaux et garantir un champ d'expérience unique pour toutes les images d'essai de chaque système proposé. Cela a été rendu techniquement possible en recourant à un convertisseur de format qui met sous forme numérique le signal de sortie de la caméra analogique pour chacun des formats de balayage et

réorganise les données obtenues pour qu'on puisse les enregistrer sur un magnétoscope numérique 1 125 lignes à haute définition du commerce. Les bandes ainsi obtenues repassent par le convertisseur de format pour être présentées et les scènes sont ramenées à leur format d'origine, processus transparent qui permet que toutes les images d'essai soient identiques et reproductibles. Grâce au convertisseur de format, on peut enregistrer tous les résultats d'essai pour archivage et utiliser pour les essais subjectifs des bandes préenregistrées au lieu de se servir de caméras en direct et de faire fonctionner en permanence les appareils fournis par les auteurs de propositions.

La délicate tâche du tournage des images vidéo au cours duquel il faut soigneusement associer l'action, l'éclairage et les angles de prise de vue afin d'être sûr d'avoir des images d'essai identiques pour chaque format voulu a été effectuée sous le contrôle d'un groupe de spécialistes dans le cadre de l'ACATS. La vidéo elle-même a été préparée par un important studio à New-York sous le contrôle du chef de l'ATEL qui dirigera ensuite les essais subjectifs effectués avec ces images.

3.6.2 Valeurs des caractéristiques des systèmes de radiodiffusion de TVHD numérique de Terre proposés

Au cours des douze derniers mois, on a assisté aux Etats-Unis d'Amérique à un changement radical de la position des auteurs de propositions pour une télévision évoluée mais aussi à une évolution de la conception de leurs systèmes. Le premier système entièrement numérique a été proposé en juin 1990 puis la conception des trois premiers systèmes hybrides proposés a évolué vers le tout numérique. Tous les auteurs de proposition tout numérique prétendent que leur système peut garantir la qualité de la vraie TVHD dans toute la zone de service de la station. Ils promettent que les méthodes tout numériques seront plus souples, assureront une meilleure réduction de la largeur de bande, des enregistrements sans bruit sur bande en studio et chez l'utilisateur, ne présenteront ni bruit, ni brouillages, ni images fantômes résultant d'opérations de traitement ou de transmission en cascade et s'intégreront bien aux autres moyens informatiques et de télécommunications. La qualité et les caractéristiques d'un système dépendent des principes qui ont guidé sa conception. Par exemple, certains insistent sur la résolution de l'image, d'autres sur une transmission peu vulnérable. A débit de données total fixe, le compromis se fait sur l'attribution aux données.

Pour comparer les divers systèmes de radiodiffusion de TVHD numérique de Terre proposés, on trouvera sur le Tableau 3 ci-après leurs propriétés, leurs caractéristiques et leurs mécanismes. Y sont rassemblées toutes les données tirées des descriptions techniques soumises par les auteurs de propositions à la Commission consultative sur le service de télévision évoluée (ACATS) de la FCC des Etats-Unis d'Amérique. Il reste des cases vides là lorsque l'information n'était pas disponible dans les documents. Ces données sont susceptibles d'évoluer car les systèmes proposés sont encore en cours d'optimisation.

3.7 Coordination

Les systèmes numériques de TVHD ont la faculté de faciliter l'exploitation commune de divers systèmes à images à haute résolution. Le choix d'un système de télévision évoluée ayant les propriétés nécessaires à une exploitation coordonnée facilitera les échanges d'images fixes et mobile en provenance de sources diverses.

3.7.1 Avantages de l'exploitation coordonnée

Les futures retombées bénéfiques des technologies vidéo et autres seront d'autant plus importantes qu'on pourra davantage mettre en œuvre économiquement les échanges universels de toutes sortes d'images ou séquences d'images. En définitive, le bénéficiaire sera le consommateur qui pourra choisir n'importe quelle information télévisuelle sous la forme qui lui plaît, au moment de son choix et à des prix abordables.

Grâce aux progrès rapides des semi-conducteurs numériques, des télécommunications numériques et des algorithmes de traitement numériques, on pourra disposer de technologies vidéo bien adaptées à chaque application (quant à la qualité de l'image, au prix, au format et à la qualité). Le développement d'une telle diversité sur le marché de la vidéo ne sera bénéfique que si on peut facilement évoluer parmi les divers formats, applications, industries et médias. Il faut se fixer comme objectif principal l'élimination des obstacles au passage d'un format à l'autre pour que les lois du marché puissent présider au développement des produits et des services.

3.7.2 Inconvénients potentiels de l'exploitation coordonnée

L'introduction de l'exploitation coordonnée peut augmenter le prix des équipements vidéo. Par exemple, donner la souplesse voulue à un système de radiodiffusion de TVHD de Terre risque d'accroître le coût des téléviseurs. Le coût augmentera non seulement à cause des connecteurs et interfaces supplémentaires, mais aussi parce que le système sera plus complexe dans son ensemble.

TABLEAU 3

**Tableau des propriétés, des caractéristiques et des opérations de traitement
des systèmes de radiodiffusion de TVHD numérique de Terre**

	DigiCipher	DSC-TVHD	ADTV	ATVA-P
Nombre de lignes par image	1 050	787/788	1 050	787/788
Nombre d'images par seconde	29,97	59,94	29,97	59,94
Entrelacement	2:1	1:1	2:1	1:1
Rythme de balayage horizontal (kHz)	31,469	47,203	31,469	47,203
Format	16:9	16:9	16:9	16:9
Nombre de pixels vidéo actifs	1 408(H) × 960(V) (luminance) 350(H) × 480(V) (chrominance)	1 280(H) × 720(V) (luminance) 640(H) × 360(V) (chrominance)	1 440(H) × 960(V) (luminance) 720(H) × 480(V) (chrominance)	1 280(H) × 720(V)
Format des pixels	33:40	1:1	27:32	1:1
Largeur de bande (MHz)	21,5 (luminance) 5,4 (chrominance)	34 (luminance) 17 (chrominance)	27 (limite de Nyquist)	34 (luminance) 34 (chrominance)
Colorimétrie	SMPTE 240M	SMPTE 240M	SMPTE 240M	SMPTE 240M
Algorithme de compression vidéo	Codage TCD à compensation du mouvement	Codage par transformation (TCD et QV) à compensation du mouvement	Codage TCD à compensation du mouvement (basé sur MPEG)	Transformation à compensation du mouvement/codage en sous-bandes
Dimension des blocs	8 × 8	8 × 8	8 × 8	8 × 8
Fréquence d'échantillonnage (MHz)	53,65	75,3	54	75,3
Largeur de bande audio (kHz)	20	20	20	20
Fréquence d'échantillonnage audio (kHz)	48	47,203	48	48
Dynamique (dB)	85	96	96	
Nombre de canaux son	4	4	4	4

TABLEAU 3 (suite)

	DigiCipher	DSC-TVHD	ADTV	ATVA-P
Débit des données vidéo (Mbit/s)	12,59 (MAQ-16) 17,49 (MAQ-32)	Varie automatiquement de 8,6 à 17,1	14,98 (peut être partagé avec sons ou données supplémentaires)	15,636
Débit des données audio (Mbit/s)	0,503	0,5	0,512 (nominal)	0,5
Données de contrôle (kbit/s)	126	40 (réserve)	40 (données)	126 (contrôle d'accès)
Données auxiliaires (kbit/s)	126	413	512 (nominal)	126
Synchronisation	Sans objet	292 à 544 kbit/s	Sans objet	Sans objet
Débit total (Mbit/s)	19,51 (MAQ-16) 24,39 (MAQ-32)	11,1 à 21,0	21,00	19,43
Marge pour la correction des erreurs (Mbit/s)	6,17	1,3 à 2,4	23,6% (4,96)	3,042
Modulation RF (de Terre)	MAQ-16 ou MAQ-32	BLR à 2 ou 4 niveaux	MAQ à mise en forme du spectre	MAQ-16
Largeur de bande à 3 dB (de Terre) (MHz)	4,88	5,38	5,2	4,86
C/N au seuil (de Terre) (dB)	12,5 (MAQ-16) 16,5 (MAQ-32)	16 (données à 4 niveaux) 10 (données à 2 niveaux)	16	19
Egalisation du canal (suppression des images fantômes) (μ s)	-2 à +24 (images fantômes multiples)	-2 à +20 (images fantômes multiples)	16 (peut passer à 40)	2 (trajets multiples complexes) 32 (un seul autre long trajet)
Modulation RF (par satellite)	MDP-4	MDM	MDP-4	
Largeur de bande (par satellite)	24 MHz/2 canaux	20 MHz/canal	24 MHz/2 canaux	
C/N au seuil (par satellite) (dB)	7,5	8	8	

Note 1 – Ces données peuvent être modifiées; elles ont été fournies par les auteurs des propositions; les méthodes de mesures varient d'un système à l'autre.

3.7.3 Types d'exploitation coordonnée

Les possibilités d'exploitation coordonnée de l'image existent à plusieurs niveaux et échelles: entre différents formats du signal, entre différents moyens d'acheminement, entre différentes industries, entre des applications différentes, entre différentes époques et entre des entités géopolitiques différentes.

3.7.4 Importance de la représentation sous forme numérique en vue de l'exploitation coordonnée

La représentation du signal sous forme numérique est l'élément essentiel pour arriver à une exploitation coordonnée des images et de la vidéo. La nature numérique du signal signifie que tous les systèmes qui le traitent, travaillent sur le même matériau. La facilité du stockage, du transport et du traitement des données numériques est associée à l'augmentation de la vitesse et de la puissance des semi-conducteurs et à la diminution de leur prix.

Une fois mis sous forme numérique, on peut filtrer et traiter les signaux de façon prévisible et reproductible de sorte qu'on pourra mettre en œuvre les conversions d'un format à un autre au moyen de fonctions issues de théories mathématiques comme l'échantillonnage, l'interpolation et la prédiction.

3.7.5 Industries intéressées par des images à haute résolution

Alors que l'industrie traditionnelle de la télévision grand public s'est centrée sur un format unique principal (NTSC aux Etats-Unis d'Amérique), l'industrie de la télévision institutionnelle a créé un grand nombre de formats d'image fixe ou mobile. Dans certains cas, ces applications institutionnelles ont recouru au NTSC bien que ses caractéristiques ne répondent pas toujours à leurs exigences.

On estime généralement que la technologie a atteint un stade où vont s'établir de nombreuses normes nouvelles et il ne faudrait pas manquer cette occasion de coordonner les diverses normes d'image et vidéo. On trouve des partisans de cette coordination dans les industries de l'informatique, de l'informatique graphique et des télécommunications ainsi que parmi l'intelligentsia.

Ces industries sont en faveur d'une exploitation coordonnée qui permettrait d'avoir la même technologie pour le vaste marché de la télévision grand public et celui des applications institutionnelles à l'image et à la vidéo, ce qui le rendrait encore plus vaste.

3.7.6 Propriétés spécifiques qui favorisent l'exploitation coordonnée

Certaines propriétés particulières aux systèmes image favorisent l'exploitation coordonnée comme cela est expliqué ci-après.

3.7.6.1 Représentation numérique

Les systèmes DigiCipher, DSC-TVHD, ADTV et ATVA-P ont recours au traitement et à la radiodiffusion numériques et répondent donc à la principale exigence de l'exploitation coordonnée, à savoir la représentation numérique du signal.

3.7.6.2 Balayage progressif

Le balayage progressif de séquence d'images tramées simplifie dans une certaine mesure, le filtrage et l'interpolation servant aux conversions entre formats qui diffèrent par le nombre de lignes de balayage, le nombre d'échantillons par ligne et l'échantillonnage temporel (par exemple le rythme des images). DSC-TVHD et ATVA-P emploient le balayage progressif.

3.7.6.3 Pixels carrés

Pour les images d'ordinateur, il est souhaitable que les échantillons adjacents soient également espacés dans le sens horizontal et dans le sens vertical pour représenter simplement des objets susceptibles d'être modifiés après leur création. DSC-TVHD et ATVA-P ont des pixels carrés.

3.7.6.4 Insertion d'en-têtes et de descripteurs parmi les données

Les partisans de l'exploitation coordonnée et de la coordination sont d'accord sur un point important: il est souhaitable d'incorporer des en-têtes et des descripteurs dans les trains de données vidéo. Ils servent à identifier à coup sûr et sans ambiguïté la forme des données. Les en-têtes peuvent donner des informations sur la façon dont les images ou séquences d'images ont été produites, traitées et comprimées. Ils utiliseront une faible partie de la capacité réservée aux données pour que les trains de données s'identifient eux-mêmes.

DigiCipher, DSC-TVHD, ADTV et ATVA-P fournissent les données auxiliaires sous forme numérique. On pourrait se servir d'une partie de la capacité du canal des données auxiliaires pour que, grâce aux en-têtes et aux descripteurs, les trains de données d'image s'identifient eux-mêmes.

3.8 *Autres systèmes de Terre*

Un certain nombre de systèmes de distribution de Terre serviront à mettre la TVHD numérique à la portée du public en général. La qualité du canal de transmission de ces systèmes, comme le câble, les services de distribution multipoint à plusieurs canaux et les réseaux en fibre optique, aura ses propres limitations intrinsèques. Il est important que le système retenu soit exempt de ces limitations du canal de transmission. Certains essais du programme signalent ces limitations. En dernier ressort, il faut que la qualité du signal reçu ne dépende pas du moyen d'acheminement du signal chez le téléspectateur.

4. Conclusions

On a montré que la radiodiffusion de la TVHD numérique de Terre était réalisable dans le cadre des contraintes qu'imposent les bandes d'ondes métriques et décimétriques actuelles.

On étudie actuellement dans le monde entier plusieurs techniques possibles de codage à la source, de codage de canal et de modulation en espérant que cette activité permettra de faire progresser sensiblement la technologie et assurera une qualité suffisante.
