

RAPPORT UIT-R BT.2042-1

La technologie de l'imagerie à ultra haute résolution

(Question UIT-R 40/6)

(2004-2006)

1 Introduction

Le présent Rapport présente une hiérarchie de résolutions spatiales, exposée dans la Recommandation UIT-R BT.1201 et résumée dans le Tableau 1, aux fins de la classification, par référence à la résolution spatiale, des systèmes d'imagerie à ultra haute résolution (EHRI, *extremely high resolution imagery*). Les techniques disponibles dans ce domaine étant extrêmement limitées, nous avons été contraints de considérer essentiellement les applications d'imagerie fixe (c'est-à-dire autres qu'en temps réel). Les systèmes récemment mis au point pour l'imagerie à ultra haute résolution en temps réel sont signalés, mais il s'agit de systèmes encore au stade expérimental. Pour l'essentiel, les applications temps réel peuvent d'ailleurs être définies par référence à la cadence d'image, indépendamment de la hiérarchie de résolution spatiale.

L'attention du lecteur est appelée sur le Tableau 17, où sont mentionnées certaines questions qui appellent un complément d'étude.

TABLEAU 1

EHRI: hiérarchie de résolutions spatiales

	EHRI-0	EHRI-1	EHRI-2	EHRI-3
Résolution spatiale (nombre d'échantillons)	1 920 × 1 080	3 840 × 2 160	5 760 × 3 240	7 680 × 4 320

Cette hiérarchie a été établie pour le format 16:9, largement utilisé.

Les niveaux EHRI-1 à 3 correspondent à des multiples entiers du nombre de pixels de la hiérarchie EHRI-0 (1 920 × 1 080) dans le sens horizontal et dans le sens vertical, c'est-à-dire que le multiplicateur correspond à la valeur du suffixe plus 1.

La hiérarchie EHRI du Tableau 1 se rapporte au domaine spatial et ne concerne aucunement l'axe temporel. Pour l'imagerie en temps réel, la classification des images se fait par référence à la cadence d'image sur l'axe temporel.

1.1 Systèmes EHRI à l'étude au Japon

L'évolution récente des techniques EHRI fait apparaître que des systèmes en temps réel de niveaux EHRI-1 et 2 (Tableau 1) sont réalisables. De tels systèmes sont encore à l'étude, et la diffusion de systèmes et de produits EHRI compatibles avec des applications pratiques ne se fera pas avant plusieurs années. Toutefois, il est toujours possible qu'une application miracle de l'EHRI accélère la mise au point des équipements essentiels et donc des éléments du système.

TABLEAU 2

**Hiérarchie EHRI et principaux paramètres des systèmes
Systèmes EHRI à l'étude au Japon (septembre 2002)**

Fabricant	Paramètres						Equipements réalisés
	Niveau EHRI	Format	Résolution horizontale (pixels)	Résolution verticale (pixels)	Cadence d'image (Hz)	Balayage	
CRL et JVC	EHRI-1	16:9	3 840	2 160	30/60	Progressif	Caméra et système d'affichage
NTT	EHRI-1	16:9	3 840	2 160	24/48/(96)	Progressif	Système d'affichage
NHK	EHRI-1	16:9	3 840	2 160	60	Progressif	Caméra (réalisée un an plus tôt, en 2001)
NHK	EHRI-3	16:9	7 680	4 320	60	Progressif	Caméra et système d'affichage

CRL: Communications Research Laboratory

JVC: Victor Company of Japan

NTT: Nippon Telegraph and Telephone Corporation

NHK: Japan Broadcasting Corporation

NOTE 1 – Les systèmes expérimentaux ont été portés à la connaissance de l'UIT-R, par voie de contribution, en septembre 2002.

CRL et JVC ont réalisé en commun, sous la dénomination «Quadruple HDTV», une caméra et un système d'affichage 2 000 lignes. La caméra est dotée de trois capteurs CMOS de $3\,888 \times 2\,192$ pixels, et produit en sortie quatre signaux vidéo (quatre canaux TVHD). Le projecteur est doté de trois matrices LCD de $3\,840 \times 2\,048$ pixels. Sa puissance lumineuse est de 5 200 lm, et son facteur de contraste est supérieur à 750:1. La résolution du système correspond à 2×2 systèmes de $1\,920 \times 1\,080$ pixels.

NTT a également réalisé un système de cinéma numérique capable de mémoriser, transmettre et afficher des images de 2 000 lignes, dont les composantes R, V et B sont codées sur 10 bits. Le projecteur est identique à celui mis au point par CRL et JVC. Les images sources sont des films argentiques 35 mm tournés à 24 images/s, et la cadence du système est de 24 ou 48 images/s. L'image projetée est rafraîchie 96 fois/s, ce qui permet de supprimer le scintillement. La résolution de ce système correspond également à 2×2 systèmes $1\,920 \times 1\,080$ pixels.

NHK a mis au point un système EHRI-3 composé d'une caméra vidéo et d'un projecteur nouveaux par rapport au système antérieur EHRI-1. Ce système comporte quatre matrices CCD et LCD. Le nombre maximum de pixels d'une matrice CCD ou LCD étant actuellement de $3\,840 \times 2\,048$, les quatre matrices (deux pour le vert, une pour le rouge et une pour le bleu) donnent ensemble une résolution de $8\,k \times 4\,k$ pixels. Les deux matrices spécialisées dans le vert présentent un décalage diagonal des pixels qui permet d'obtenir la résolution recherchée. Cette résolution correspond à 4×4 fois celle d'un système $1\,920 \times 1\,080$ pixels.

1.2 Les systèmes à balayage progressif 1 920 × 1 080/60 images existant au Japon en 2003

1.2.1 Situation actuelle des systèmes 1 920 × 1 080/60 I

– Caméra à capteur CCD 2/3 pouce

Une caméra 1 920 × 1 080/60 images/s dotée de trois capteurs CCD par composante (R, V, B) a été réalisée par NHK en 2003. La résolution horizontale et la résolution verticale de cette caméra de TVHD expérimentale à balayage progressif sont d'environ 1 000 lignes de télévision sur chaque axe, et la réponse de fonction de transfert de modulation (FTM) verticale est d'environ 57% sur 700 lignes et 30% sur 1 000 lignes.

– Systèmes d'affichage 60 images/s disponibles dans le commerce

Pendant longtemps, on a cru qu'il serait difficile de réaliser des moniteurs à tube cathodique (CRT, *cathode ray tube*) 1 080/60 images/s à balayage progressif, du fait que la réponse de la déviation horizontale d'un CRT ne se stabilise qu'au bout d'un certain temps. Une nouvelle technique permet de surmonter ce problème sans modifier la réponse des circuits de déviation des moniteurs. En augmentant légèrement la réponse du circuit vidéo ainsi que la vitesse de lecture de la mémoire, la partie image du signal vidéo peut être comprimée dans le domaine temporel, ce qui ménage dans le signal vidéo un plus grand intervalle horizontal de suppression de trame. C'est sur cette technique que repose le balayage progressif 60 images/s 1 920 × 1 080. Un moniteur professionnel de ce type est déjà commercialisé au Japon par l'un des fabricants d'équipements professionnels de radiodiffusion. La spécification de balayage du moniteur cathodique couvre non seulement la cadence d'images 24 mais également la cadence 60.

– Interface 1 080/60 I

Dans un système 1 080/60 images, l'interface avec les composants du système est un élément critique. Fort heureusement, on dispose de la norme SMPTE 372M-2002, applicable aux liaisons entre les divers équipements. Cette norme intitulée «Dual Link 292M Interface for 1 920 × 1 080 Picture Raster» (interface 292M à double liaison pour matrice 1 920 × 1 080), repose sur l'utilisation de deux connexions HD-SDI qui assurent la transmission des données à 2,970 Gbit/s. La spécification couvre les interconnexions 1 920 × 1 080 60 images/4:2:2/10 bits. Dans ce cas, chaque liaison conforme à la Recommandation UIT-R BT.1120 achemine un flux de données série codées sur 10 bits, selon la définition de la Recommandation UIT-R BT.709.

1.2.2 Technologies et produits attendus sur le marché

– Projecteurs disponibles avant la fin 2004

La disponibilité de projecteurs 1 080/60 I relève plutôt de la planification commerciale que de la technologie à proprement parler. La vitesse de traitement est un aspect technique fondamental dans tout système à balayage progressif, mais le problème n'est pas tellement difficile à résoudre; la solution est relativement simple et n'appelle pas de technique nouvelle.

Le véritable problème consiste à réaliser un projecteur répondant à la demande tout en pouvant être vendu à un prix compétitif. L'un des fabricants japonais de matériels de radiodiffusion prévoit de commercialiser avant la fin 2004 un projecteur 1 920 × 1 080 «bi-mode» à 50/60 images/s.

– Capteurs CCD et CMOS pour caméras 1 080/60 I

Pour l'acquisition, il nous faut disposer de caméras à balayage progressif 60 images fonctionnant vraiment en 60 images progressif. On a déjà annoncé la commercialisation prochaine d'un capteur optique pour caméra 1 080/60 I, réalisé sur la base d'un capteur CCD existant. Pour cette cadence d'image, il n'est pas nécessaire d'utiliser un capteur optique CMOS à grande vitesse de traitement.

Au reste, une caméra à capteur CMOS sera sans doute commercialisée parallèlement aux caméras progressives 60 images à CCD.

– **Capacité d'enregistrement**

Le débit de données correspondant au format progressif $1\,920 \times 1\,080/60$ I est deux fois plus élevé que celui d'un système $1\,920 \times 1\,080/60$ I à entrelacement. Pour enregistrer sur bande des signaux progressifs $1\,920 \times 1\,080/4:2:2/10$ bits/60 images, il faut disposer d'un magnétoscope numérique capable de traiter un flux de données de $1,24 \times 2$ Gbit/s pour la seule vidéo. Les techniques de compression sont largement utilisées en enregistrement vidéo, et la qualité d'image ainsi obtenue est bien acceptée. La gamme de magnétoscopes proposée actuellement par plusieurs fabricants comprend des appareils capables d'enregistrer des flux de données vidéo nets de 880 Mbit/s. En combinant les diverses techniques disponibles, il est tout à fait possible de réaliser un enregistreur $1\,080/60$ I progressif. L'un des fabricants japonais de matériels de radiodiffusion a récemment publié les spécifications d'un magnétoscope portatif de la gamme HDCAM, capable d'enregistrer des signaux progressifs $1\,920 \times 1\,080/4:2:2/10$ bits/60 I avec un facteur de compression de 2,7.

1.2.3 Résumé

Le Japon a communiqué à la CE 6 de l'UIT-R, pour le programme de réunions de l'année 2002, un rapport d'activité sur l'EHRI. Ce rapport décrit plusieurs systèmes EHRI progressifs présentant une cadence d'images de 60 images/s. Les systèmes décrits en sont encore au stade expérimental, mais plusieurs produits capables de fonctionner en mode progressif à 60 images/s sont déjà disponibles. Les consommateurs étant de plus en plus nombreux à demander des applications progressives à 60 images/s, la gamme de produits compatibles avec ce type d'application va naturellement se développer. Sur le plan technique, la tendance s'inscrit manifestement dans ce sens.

1.2.4 Bibliographie

Document 6-9/52, Document 6P/137: «Progress report on extremely high resolution imagery applicable to digital cinema», contribution du Japon.

Contribution sur le cinéma numérique, septembre 2001: «Ultra-high definition video camera», NHK Science & Technical Research Laboratories.

Norme SMPTE: SMPTE 372M-2002: «Dual Link 292M Interface for $1\,920 \times 1\,080$ Picture Raster».

2 Considérations générales sur les techniques EHRI actuelles

2.1 Traitement d'images fixes/distinctes (pratique actuellement utilisée dans la préparation des programmes)

On sait bien que les réalisateurs des films récents utilisent souvent divers effets optiques numériques et que les opérations de traitement évoluées des images rendent ces films extrêmement attrayants pour la majorité des spectateurs. Les effets optiques numériques (traitement électronique du film) offrent un nouvel outil aux réalisateurs, qui disposent au niveau de la postproduction en studio de techniques rentables et éprouvées qui permettent de remplacer avec efficacité les procédés optiques d'antan. Les compositions informatiques, la réalisation de caches et de projets sur fond bleu, la retouche électronique (suppression d'éléments indésirables de l'image, modification des couleurs et du contraste dans le cas de films anciens ou endommagés, ...) font partie de ces nouvelles techniques.

Plusieurs systèmes de ce type sont disponibles sur le marché qui sont utilisés avec d'excellents résultats. La chaîne de montage se compose d'un scanner CCD, d'un enregistreur de sortie et de modules de traitement du signal faisant intervenir des postes de travail à processeurs ultra rapides. On utilise généralement pour produire ces effets des postes de travail et des logiciels spécialisés, capables de traiter des images de qualité cinéma à ultra haute résolution (plus de 40 fois la résolution du signal de télévision conventionnel).

2.2 Infographie

L'ordinateur permet de produire des images graphiques de très haute qualité, produites en temps différé, et la technologie ne pose en la matière aucun problème sérieux. Sous réserve de disposer d'une capacité de mise en mémoire sur disque suffisante et d'un ordinateur doté d'un processeur extrêmement rapide, les divers paramètres – résolution spatiale, format, résolution temporelle, etc. – peuvent être en principe établis en fonction de la demande. Toutefois, la production d'images animées en temps réel est difficile avec la technologie actuelle. La difficulté dépend de la complexité de l'image à produire et de la technologie infographique utilisée. La génération d'images infographiques simples donne de bons résultats dans certaines applications en temps réel – réalité virtuelle, simulateurs de vol, jeux.

Actuellement, pour la production de programmes de TVHD, il faut environ 0,25 heure de temps ordinateur à 800 MIPS pour générer une image de personnage. Pour réaliser une image de niveau EHRI-3 avec la même technologie, il faut 4 heures de temps ordinateur (résolution 4×4). Pour réaliser des images infographiques de haute résolution, il faut donc toujours disposer de processeurs extrêmement puissants (valeurs MIPS) et adopter des logiciels graphiques spécialisés.

3 Imagerie à ultra haute résolution: techniques et équipements

3.1 Systèmes d'affichage

Au Japon, le nombre d'écrans de TVHD utilisés par les particuliers dans des installations de vidéophile augmente régulièrement suite à l'introduction de la TVHD numérique par satellite, et ces moniteurs sont aujourd'hui beaucoup moins onéreux qu'il y a quelques années.

L'ordinateur personnel est par ailleurs de plus en plus répandu, non seulement au bureau, mais encore au domicile des particuliers, et le phénomène coïncide avec la pénétration de plus en plus large de l'Internet. L'interface graphique utilisateur de «Windows» demande une résolution d'affichage très supérieure à la résolution VGA (640×480), par exemple XGA ($1\ 024 \times 768$) ou SXGA ($1\ 280 \times 1\ 024$). Les moniteurs des postes de travail courants affichent en SXGA ou en UXGA ($1\ 600 \times 1\ 200$). A l'horizon 2005, on trouvera sur le marché des moniteurs WUXGA ($1\ 920 \times 1\ 200$) et QXGA ($3\ 200 \times 2\ 400$) de type TFT à cristaux liquides, qui seront utilisés dans certaines applications.

Avec le multimédia, et particulièrement avec les nouvelles applications interactives de la télévision, les caractéristiques requises des systèmes d'affichage évoluent. Les systèmes d'affichage doivent maintenant présenter à la fois les caractéristiques des écrans de télévision et celles des écrans d'ordinateur, qui diffèrent comme suit:

- La non-linéarité du gamma d'un affichage par CRT est compensée avant la radiodiffusion par une préégalisation, tandis que les images générées par un ordinateur personnel ne subissent aucun traitement de préégalisation. L'affichage simultané d'images de ces deux types différents sur un même écran ne peut donc se faire qu'avec un compromis.

- L'uniformité de la résolution de l'image sur la totalité de l'écran est essentielle dans le cas d'un moniteur d'ordinateur. En revanche, dans le cas d'un écran de télévision, on ne recherche pas tant l'uniformité que la luminosité; or, ces deux caractéristiques sont difficiles à rassembler sur un même écran moniteur.
- Généralement, l'image est affichée sur un écran de télévision avec un surbalayage d'environ 10%. Sur un écran d'ordinateur, il n'y a pas de surbalayage. Mis à part les CRT, on dispose aujourd'hui de plusieurs autres nouveaux systèmes d'affichage. La vidéoprojection et les panneaux géants offrent la possibilité de visualiser des images sur des écrans de grande dimension, ce qui est très intéressant lorsqu'un grand nombre de personnes souhaitent par exemple regarder un programme ensemble. La vidéoprojection fait intervenir diverses technologies: (CRT), cristaux liquides sur silicone (LCOS, *liquid crystal on silicon*) et système à micromiroirs (DMD, *digital micro-mirror device*). La technologie des plasmas (PDP, *plasma display panel*) permet de réaliser des écrans parfaitement plats. Les écrans à cristaux liquides, proposés en diverses dimensions, sont très populaires. Pour les ordinateurs, on dispose par exemple d'écrans XGA 15 pouces, SXGA 17 pouces et WUXGA 24 pouces. Les applications des cristaux liquides sont également de plus en plus utilisées pour les téléviseurs, avec des écrans de 28 pouces déjà disponibles dans le commerce.

Les systèmes CRT et PDP exploitent l'électroluminescence de phosphores («luminophores») spécialisés vert/bleu/rouge. Les systèmes à cristaux liquides fonctionnent par variation de la quantité de lumière émise par une ampoule, tandis que les systèmes DMD reposent sur la commutation de micromiroirs qui renvoient la lumière incidente sur le bloc optique. Pour l'affichage des couleurs, le rouge, le bleu et le vert sont séparés par un «prisme dichroïque» qui les aiguille vers le système de modulation du projecteur.

3.1.1 L'affichage par CRT

Dans le cas d'un affichage par CRT, on peut obtenir pour une dimension d'écran d'environ 20 pouces une résolution d'approximativement 1 000 lignes, avec un pas de perforation du masque d'environ 0,3 mm. Pour les systèmes de haute qualité, on a déjà réalisé des masques à pas de 0,15 mm. Le pas – l'intervalle entre les perforations – dépend d'un grand nombre de facteurs techniques – épaisseur du masque, conditions de fabrication, etc. Au niveau actuel de la technologie, on estime que la limite se situe à environ 0,16 mm pour un CRT de 40 pouces. Le diamètre du faisceau électronique de balayage est d'environ 1-2 mm. Pour obtenir une résolution supérieure, il faudrait ramener le diamètre du faisceau à environ 0,5-1 mm.

Il est par ailleurs nécessaire d'accroître la vitesse d'excitation du circuit de déviation du CRT. On y parvient en réduisant le diamètre de la bobine de déviation et en limitant les pertes au centre. Un circuit de compensation numérique est nécessaire pour réduire les erreurs de déviation.

Le Tableau 3 résume les principales applications haute résolution des systèmes d'affichage par CRT et certaines des caractéristiques des produits disponibles sur le marché.

TABLEAU 3
Exemples de systèmes d'affichage par CRT disponibles
pour des applications à haute résolution

Domaine d'application		Médical	Affichage graphique	Moniteur TVHD
Système d'affichage	Dimensions	21 pouces	32 pouces	30 pouces
	Format		1:1	19:6
Nombre de pixel		2 048 × 2 560	2 048 × 2 048	1 920 × 1 080
Espacement des luminophores		Affichage continu (noir et blanc)	0,31 mm	
Facteur de contraste		10 bits numérique/analogique		
Balayage	Horizontal	186 kHz	126,8 kHz	
	Vertical	72 images/s sans entrelacement	60 images/s sans entrelacement	
Dimensions	Profondeur		1 000 mm	
	Poids		100 kg	

3.1.2 Affichage par projection

Il existe plusieurs techniques de système d'affichage par projection, de sorte que de nombreux produits sont disponibles sur le marché. Le Tableau 4 reprend les caractéristiques de divers systèmes de projection pour applications haute résolution.

TABLEAU 4
Exemples de systèmes d'affichage par projection disponibles dans le commerce
pour des applications à haute résolution

Désignation	MARQUEE 9500LC	JVC DLA-M4000L	Sony VPL-FE100J	Barco ELM R12
Système de projection	3 CRT et trois objectifs	Triple D-ILA lampe Xénon 1 600 W	3 panneaux à cristaux liquides 4 lampes UHP de 120 W	3 capteurs à micromiroirs lampe Xénon 3 000 W
Système de modulation lumineuse	CRT 9 pouces	D-ILA 0,9 pouce (1 397, 760)	Matrice polysilicium 1,8 pouce (1 310 × 720)	DMD 1,1 pouce (1 310 × 720)
Résolution	2 500 × 2 000	1 365 × 1 024	1 280 × 1 024	1 280 × 1 024
Puissance lumineuse (lm)	1 300	4 000	3 500	12 000
Dimensions de l'écran (pouces)		60~600	40~500	~800
Contraste	—	—	—	500:1

TABLEAU 4 (*fin*)

Désignation	MARQUEE 9500LC	JVC DLA-M4000L	Sony VPL-FE100J	Barco ELM R12
Fréquence de balayage (horizontal/vertical)	15~152 kHz/ 38~180 images/s	15~82 kHz/ 50~78 images/s	15~100 kHz/ 50~120 images/s	
Consommation électrique	650 W	2 200 W	770 W	3 750 W
Poids (kg)	80	70	34,5	143

3.1.3 Systèmes d'affichage sur grand panneau

Dans certaines grandes villes, comme à Tokyo, on peut voir d'immenses panneaux d'affichage de publicités ou d'avis au public montés sur les murs extérieurs des bâtiments dans les quartiers très fréquentés. Ces écrans de grandes dimensions sont conçus avant tout pour des images de qualité moyenne, de télévision conventionnelle par exemple: le principal facteur de limitation est en l'occurrence le nombre d'éléments lumineux.

Les systèmes à plasma sont étudiés depuis déjà fort longtemps, et l'on dispose depuis peu d'écrans couleurs de 50 pouces. Des panneaux de 60 pouces devraient être prochainement commercialisés (résolution verticale: 640-1 024).

Pour ce qui est des affichages à cristaux liquides à visualisation directe, le principal problème, aussi bien sur le plan de la technologie que sur le plan des coûts, est la disponibilité de cristaux liquides de dimensions suffisantes. Pour les images à haute résolution, on demande le plus souvent des écrans de grandes dimensions.

3.2 Technologie d'acquisition

3.2.1 Caméra électronique

La résolution spatiale limite d'un système optique type est par hypothèse d'environ 100 lignes/mm. En conséquence, la résolution verticale pouvant être obtenue avec un système optique d'un pouce (capteur CCD de $14 \times 7,8$ mm) est de $7,8 \times 100 \times 2 = 1\,560$ lignes, et l'on considère qu'un système optique de plus d'un pouce serait requis pour toute résolution supérieure au niveau EHRI-1 ($3\,840 \times 2\,160$). Au Japon, l'organisme public de radiodiffusion NHK étudie actuellement des systèmes optiques à ultra haute résolution. Le but est de réaliser une caméra présentant une résolution de plus de 4 000 lignes. Le Tableau 6 indique les caractéristiques techniques du système actuellement étudié.

TABLEAU 5

Exemples de panneaux d'affichage disponibles pour les applications à haute résolution

	PDP	PDP
Dimensions (pouces)	42	60
Format	16:9	16:9
Espacement des pixels (mm)	$0,90 \times 0,51$	$0,972 \times 0,972$
Nombre de pixels	$1\,024 \times 1\,024$	$1\,366 \times 768$
	256	256

TABLEAU 5 (*fin*)

	PDP	PDP
Nombre de couleurs ($\times 10^4$)	1 677	1 670
Luminance (cd/m^2)	500	450
Contraste	500:1	Supérieur à 500:1
Angle de visualisation (degrés)	160	Aucun produit disponible
Puissance électrique (W)	250	Aucun produit disponible
Observations	Quelques produits disponibles	A l'étude

TABLEAU 6

Spécifications provisoires d'un futur système de prise de vue – NHK Japon

Nombre de pixels/ligne (horizontale)	4 400
Nombre de lignes verticales	2 250
Nombre de pixels (actifs)	800×10^4
Format	16:9
Images/s	60
Système de balayage	Progressif
Système de prise de vue	3CCD RVB
Dimension des capteurs CCD (mm)	$32,2 \times 17,2$ (correspondant à 2,5 pouces)
Système optique	Focale fixe (f: 50 mm)

Pour accroître la résolution avec un capteur de dimensions données, il faut réduire la taille des pixels. Pour remédier à la diminution de sensibilité qui en résulte, on utilise de plus grands capteurs, on augmente la sensibilité du système et enfin on réduit le niveau de bruit de l'équipement. Pour ce qui est du nombre et de la taille des pixels, on dispose en TVHD de capteurs CCD de 2/3 de pouce à 2 millions de pixels. La plus grande surface de ces capteurs les rend utilisables jusqu'au niveau EHRI-1, mais il faudrait de nouvelles technologies pour dépasser ce niveau de résolution. Toute réduction du rapport S/N d'une caméra entraîne une diminution du facteur de compression, de sorte qu'il est extrêmement important d'abaisser le niveau de bruit.

3.2.2 Télécinéma

Pour le télécinéma, on utilise actuellement trois méthodes d'acquisition différentes, à savoir par capteur, balayage à spot mobile et balayage laser. La plupart des problèmes que l'on rencontre avec ces techniques en imagerie haute résolution se posent au niveau des opérations en temps réel. En temps différé, la plupart des problèmes disparaissent puisque le balayage peut être effectué plus lentement.

3.2.3 Dispositif électronique de prise de vues fixes

La qualité d'une image photographique conventionnelle réalisée sur film 35 mm à sels d'argent est pour ainsi dire équivalente à celle d'une image de classe EHRI-1. Il est possible d'obtenir des résolutions très supérieures en utilisant des films de plus grand format.

On a déjà pu obtenir des images fixes avec des capteurs CCD de $100 \times 50 \text{ mm}^2$ à 51 millions de pixels, présentant une résolution supérieure au niveau EHRI-3. Une image de ce type comporte 10 080 éléments horizontaux et 5 040 éléments verticaux, et l'on peut déjà atteindre une cadence de 5 images/s.

En 2001, il existe dans le commerce un large choix d'appareils numériques à capteur de 3 millions de pixels.

3.3 Technologie de transmission

3.3.1 Transmission optique

En transmission optique, on obtient déjà, avec une longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$, des débits de plus de 2,5 Gbit/s sur des liaisons de plus de 100 km par bond. Les systèmes de transmission optique offrant une très importante capacité de transmission, comparés aux autres systèmes de transmission, seront à la base des futures infrastructures de transmission utilisées en imagerie numérique.

Le Tableau 7 résume les principaux problèmes techniques qui se posent dans le domaine de la transmission optique de signaux à très haut débit pour les applications en temps réel de l'EHRI. Manifestement, il faudra attendre une percée technologique, mais on dispose déjà en transmission optique du multiplexage par répartition en longueur d'onde dense (DWDM, *dense wavelength division multiplexing*). Les réseaux optiques à forte capacité qui font intervenir cette technique sont de plus en plus fréquemment utilisés dans diverses parties du monde.

TABLEAU 7

Transmission par faisceau optique: les problèmes techniques

	Système EHRI-0 et 1 ⁽¹⁾ en temps réel, rapport de transmission: 150 Mbit/s	Système EHRI-2 et 3 ⁽¹⁾ en temps réel, rapport de transmission: 600 Mbit/s
Système de transmission par faisceau optique	Transmission optique jusqu'à 100 Gbit/s Système à onde lumineuse cohérente Modulation lumineuse DWDM (10 longueurs d'onde) Amplification de la lumière	Transmission optique jusqu'à plusieurs Tbit/s Système à onde lumineuse cohérente Modulation lumineuse DWDM (100 longueurs d'onde) –

⁽¹⁾ Se reporter au Tableau 15 pour les définitions des niveaux EHRI-0 -1 -2 -3 en temps réel.

3.3.2 Radiodiffusion par satellite

Pour la radiodiffusion par satellite, on peut utiliser des fréquences comprises entre les valeurs de 21,4 et 22 GHz (600 MHz) assignées par la Conférence administrative mondiale des radiocommunications de Malaga Torremolinos (CAMR-92) ou des valeurs beaucoup plus élevées. Dans ce cas, du point de vue de la largeur de bande utilisée par les tubes à ondes progressives (TOP), il est possible de réaliser des répéteurs de satellite de radiodiffusion présentant une largeur de bande d'environ 300 MHz. Toutefois, en conditions réelles de radiodiffusion, en ce qui concerne la puissance électrique et les dimensions du satellite, les phénomènes d'affaiblissement et

d'absorption par l'atmosphère dans la bande des 21 GHz doivent être surmontés par une adaptation de la puissance de rayonnement en fonction du régime de précipitations de la région considérée. Les éléments techniques qui interviennent en l'occurrence sont les suivants:

- TOP à fort rendement, forte puissance, légers;
- antenne spatiale à ouverture synthétique;
- technologie des alimentations électriques des antennes à ouverture synthétique;
- technologie de régulation de la puissance de rayonnement.

3.3.3 Télévision par câble

Comparée aux systèmes actuels de transmission de signaux analogiques sur les réseaux de télévision par câble, la transmission de signaux EHRI sur des réseaux de télévision par câble appellera un certain nombre de nouvelles mesures:

- utilisation de canaux de télévision analogique multiples;
- réalisation d'un canal de transmission de haute qualité;
- valeurs de débit et de largeur de bande beaucoup plus élevées;
- utilisation de techniques numériques et optiques.

Le Tableau 8 donne des exemples de combinaisons éventuelles de largeur de bande et de niveau de modulation pour les différentes classes de la hiérarchie de transmission EHRI.

TABLEAU 8

Transmission EHRI: largeurs de bande et niveaux de modulation

Hiérarchie de transmission EHRI en temps réel ⁽¹⁾ (après compression)	Combinaison largeur de bande-niveau de modulation
EHRI-0 (50 Mbit/s)	12 MHz/MAQ-64
EHRI-0 et 1 (65-130 Mbit/s)	24-36 MHz/MAQ-64 18 MHz/MAQ-256
EHRI-2 et 3 (500 Mbit/s)	100 MHz/MAQ-256 (cadre à fibre optique requis)

⁽¹⁾ Se reporter au Tableau 15 pour la définition de la hiérarchie de transmission en temps réel.

3.4 Mémoires

3.4.1 Streamers

La tendance observée avec certains des équipements actuellement utilisés pour la mise en mémoire sur bande magnétique (8 mm, 1/2 pouce) montre que l'on peut prévoir une capacité de mémorisation de données d'environ 400 Gbit et 1 000 Gbit (voir le Tableau 9).

TABLEAU 9

Capacité données maximale de certains streamers (2005)

Streamer	Cassette 8 mm	Cassette 1/2 pouce
Capacité données disponible (gigaoctets)	400	1 000

L'enregistrement en temps réel de signaux EHRI sur bande magnétique n'est peut-être pas envisageable. Une certaine compression est considérée comme nécessaire pour réduire le volume total de données ainsi que le débit de données, qui serait trop élevé pour que l'enregistrement soit possible. Le Tableau 10 indique la capacité d'enregistrement estimative des formats de streamer considérés.

Le Tableau 10 fait apparaître que l'enregistrement en temps réel d'un signal EHRI-3 nécessite une compression de plus de 1/30. Les valeurs ont été estimées exclusivement sur la base de la capacité totale du support utilisable dans un streamer. Il importe également de tenir compte du débit de données nécessaire pour l'enregistrement effectif de flux de données EHRI, mais cette question appellera un examen plus détaillé.

TABLEAU 10

Capacité d'enregistrement estimative des streamers en 2005

Hiérarchie EHRI ⁽¹⁾	EHRI en temps réel 60 images/s débit binaire (Gbit/s)	Type de cassette utilisée	EHRI en temps réel (h)			Images fixes (nombre d'unités)
			Facteur de compression			Facteur de compression
			1/60	1/30	1/4	1/10
EHRI-0 2 millions de pixels	2,5 4:2:2 10 bits/pixel	8 mm 1/2 pouce	21,3	10,7	1,4	$7,68 \times 10^5$
			53,3	26,8	3,5	$1,92 \times 10^6$
EHRI-1 8 millions de pixels	10 4:2:2 10 bits/pixel	8 mm 1/2 pouce	5,3	2,67	0,35	$1,92 \times 10^5$
			13,3	6,68	0,88	$4,8 \times 10^5$
EHRI-2 19 millions de pixels	40 4:4:4 12 bits/pixel	8 mm 1/2 pouce	1,3	0,67	0,09	$4,8 \times 10^4$
			3,25	1,68	0,23	$1,2 \times 10^5$
EHRI-3 33 millions de pixels	72 4:4:4 12 bits/pixel	8 mm 1/2 pouce	0,74	0,37	0,05	$2,6 \times 10^4$
			1,85	0,93	0,12	$6,7 \times 10^4$

⁽¹⁾ Se reporter au Tableau 15 pour la définition de la hiérarchie en temps réel.

3.4.2 Disques

Selon la tendance actuelle, on peut s'attendre à voir augmenter la capacité d'enregistrement des supports sur disque de quatre à neuf fois à l'horizon 2005. Le Tableau 11 indique les capacités d'enregistrement actuelles des disques disponibles sur le marché.

TABLEAU 11
Capacité d'enregistrement attendue à l'horizon 2005

Support	Dimension (mm)	Capacité d'enregistrement actuelle (gigaoctets)	Capacité d'enregistrement attendue (gigaoctets)
MD	64	0,14	0,56-1,25
CD-ROM, CD-R	120	0,64	2,56-5,76
DVD-ROM, DVD-R	120	4,7	18,8-42,3

L'enregistrement en temps réel de signaux EHRI sur disques n'est peut-être pas envisageable en raison des contraintes de durée d'enregistrement et de débit de données disponible. Une certaine compression est considérée comme nécessaire pour réduire le montant total de données ainsi que le débit de données, dont les valeurs sont trop élevées pour un enregistrement direct. Le Tableau 12 indique la capacité d'enregistrement estimative des formats de disque considérés.

TABLEAU 12

Capacité d'enregistrement calculée des vidéodisques, en fonction du niveau EHRI ⁽¹⁾ (2005)	EHRI temps en réel, 60 images/s débit binaire (Gbit/s)	Support mémoire sur disque	EHRI en temps réel (h)			Images fixes (nombre d'unités)
			Facteur de compression			Facteur de compression
			1/60	1/30	1/4	1/10
EHRI-0 2 millions de pixels	2.5 4:2:2 10 bits/pixel	MD	0,06	0,03	–	2×10^3
		CD	0,3	0,1	0,02	9×10^3
		DVD	2,3	1,1	0,15	$8,1 \times 10^4$
EHRI-1 8 millions de pixels	10 4:2:2 10 bits/pixel	MD	0,01	0,01	–	5×10^2
		CD	0,06	0,03	–	2×10^3
		DVD	0,56	0,28	0,04	2×10^4
EHRI-2 18 millions de pixels	40 4:2:2 12 bits/pixel	MD	–	–	–	1×10^2
		CD	0,02	0,01	–	6×10^2
		DVD	0,14	0,07	–	$5,1 \times 10^3$
EHRI-3 32 millions de pixels	72 4:2:2 12 bits/pixel	MD	–	–	–	7×10
		CD	0,01	–	–	3×10^2
		DVD	0,08	0,04	–	$2,8 \times 10^3$

⁽¹⁾ Se reporter au Tableau 15 pour la définition de la hiérarchie en temps réel.

Le Tableau 12 indique les valeurs de capacité d'enregistrement que l'on obtiendra lorsque la technologie aura progressé (valeurs neuf fois supérieures aux valeurs actuelles). Le Tableau 12 fait apparaître que, pour des images animées, un facteur de compression inférieur à 1/30 donnera des temps d'enregistrement trop courts et qu'un facteur de compression de 1/60 au niveau EHRI-0 donnera un temps d'enregistrement comparable à celui d'un LD analogique actuel.

3.5 Codage et traitement de l'image

3.5.1 Observations générales

Au niveau EHRI en temps réel, la télévision à ultra haute définition impose le traitement d'énormes quantités de données. Il est donc très important de parvenir, tout en conservant une qualité d'image élevée, à réduire le débit binaire de façon efficace et économique afin de l'adapter à la largeur de bande du support de transmission et à la capacité du support mémoire.

Le Tableau 13 indique l'ordre de grandeur du facteur de compression associé à chaque étape de traitement de la chaîne de réduction du débit binaire.

TABLEAU 13
Facteur de compression des données d'image à chaque étape de la chaîne de traitement

Facteur de compression dans le domaine spatial: transformée en cosinus discrète	5-10
Compression dans le domaine temporel: compensation de mouvement	2-3
Compression en fonction des caractéristiques statistiques des données: codage de longueur variable	1,3-1,5
Facteur de compression moyen	15-30

3.5.2 La norme studio MPEG-4

Le champ d'application de la norme MPEG-4 est relativement large, puisque cette norme peut s'appliquer non seulement à des applications à forte compression pour des transmissions à largeur de bande limitée reposant sur un nouveau système de codage d'objets, mais encore à des applications d'imagerie de qualité élevée: compression d'image avec codage à 10/12 bits par pixel, codage en composantes 4:4:4 et codage à haute résolution.

Le Tableau 14 résume la définition proposée pour les différents profils de la norme studio MPEG-4.

TABLEAU 14
Profils de la norme studio MPEG-4

Niveau		Dimensions maximales de l'image	Débit d'échantillonnage total maximal ⁽¹⁾	Débit binaire maximal	Autres aspects
Base (compatible avec MPEG-2 niveau élevé)		H: 1 920 pixels V: 1 088 lignes Cadence d'image: 30/s	125 337 600 = 1 920 × 1 088 × 30 × 2	300 Mbit/s	4:2:2 10 bits
Principal	422	H: 2 048 pixels V: 2 048 lignes Cadence d'image: 60/s	250 675 200 = 1 920 × 1 088 × 60 × 2 > 2 048 × 2 048 × 30 × 2	600 Mbit/s	4:2:2 10 bits
	444		376 012 800 = 1 920 × 1 088 × 60 × 3 > 2 048 × 2 048 × 30 × 3	800 Mbit/s	4:2:2 4:4:4 (YPbPr et RVB) 10 bits

TABLEAU 14 (*fin*)

Niveau		Dimensions maximales de l'image	Débit d'échantillonnage total maximal ⁽¹⁾	Débit binaire maximal	Autres aspects
Elevé	422	H: 4 096 pixels V: 4 096 lignes Cadence d'image: 120/s	805 306, 368 = $4\,096 \times 4\,096 \times 24 \times 2$ > $1\,920 \times 1\,088 \times 120 \times 2$	1,2 Gbit/s	4:2:2 10 bits/ 12 bits
	444		1 207 959 552 = $4\,096 \times 4\,096 \times 24 \times 3$ > $1\,920 \times 1\,088 \times 120 \times 3$	2,5 Gbit/s	4:2:2 4:4:4 (YPbPr et RVB) 10 bits/ 12 bits

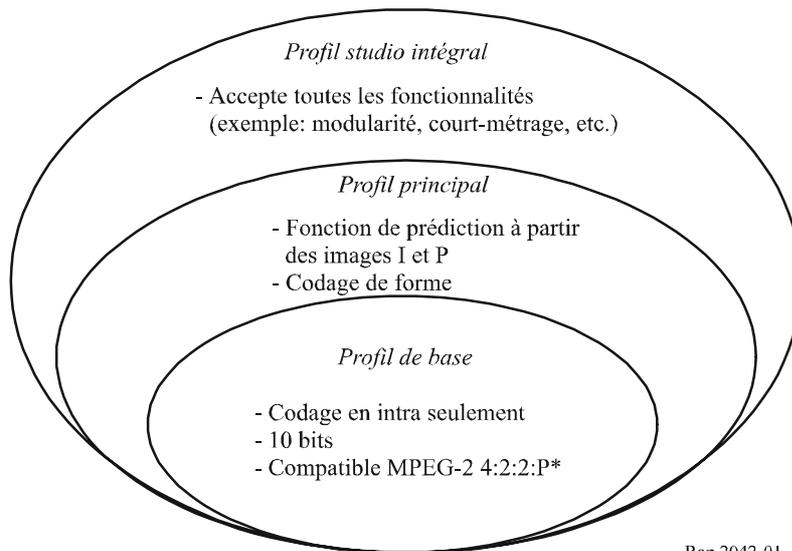
⁽¹⁾ Le niveau de qualité de fonctionnement du décodeur MPEG-2 est évalué par référence au débit d'échantillonnage à la valeur de luminance maximale. Dans le cas de la norme MPEG-4, le débit d'échantillonnage total est une bonne référence de qualité de fonctionnement du circuit puisqu'un système MPEG-4 traite normalement davantage d'échantillons de chrominance qu'un codage 4:4:4.

- Profil de base: Ce profil est pour l'essentiel compatible avec le profil élevé de la MPEG-2. La différence réside dans la prise en charge du codage sur 10 bits dans la MPEG-4. Ce profil est utile pour la conversion et la réutilisation des éléments codés en MPEG-2 [HL@4:2:2P](#) dans les applications de studio.
- Profil principal: Ce profil est prévu pour la production de télévision numérique et le télécinéma. En télévision numérique, la production impose des sources progressives $1\,920 \times 1\,080 \times 60$. L'équipement de télécinéma doit accepter les formats d'image haute résolution de type $2\,048 \times 2\,048 \times 24/25/30$, 10 bits par pixel.
- Profil élevé: Ce profil est prévu pour les systèmes de supercinéma et le télécinéma «haut de gamme». A l'avenir, le supercinéma pourra fonctionner à 120 images/s. Un équipement de télécinéma haut de gamme doit accepter des images haute résolution ($4\,096 \times 4\,096 \times 24$, 10 ou 12 bits).

La structure proposée pour les profils MPEG-4 studio se présente comme illustré à la Fig. 1.

FIGURE 1

Projet de structure des profils de la norme MPEG-4 studio



NOTE 1 – La compatibilité avec le profil MPEG-2 4:2:2 comprend les deux types de fonctionnalité suivants:

- compatibilité en aval: le décodeur MPEG-4 comprend le MPEG-2 VLD et les outils de décodage;
- transparence de transcodage: perte de qualité minimale en transcodage dans le sens MPEG-4 à MPEG-2 4:2:2P. Si possible, la rétrocompatibilité est préférée.

Le profil de base est un ensemble minimal de fonctions de studio qui comprend les outils de production les plus simples. Cet ensemble de fonctionnalités doit assurer la compatibilité avec le profil MPEG-2 4:2:2.

Le Tableau 15 indique le facteur de compression requis pour la transmission de chaque image EHRI en temps réel.

Les spectateurs remarquent rarement la dégradation de la qualité de l'image, après distribution secondaire, lorsque le facteur de compression est d'environ 15 à 30, comme l'indique le Tableau 13. Une réduction complémentaire du débit binaire doit être possible si l'on exploite les caractéristiques de sensibilité de l'oeil humain ou si l'on a recours à un filtrage. On considère donc comme réalisable un facteur de compression compris entre 1/25 et 1/50, compte tenu de la qualité acceptable en distribution secondaire. Toutefois, en ce qui concerne la qualité de l'image du programme source, il faudrait peut-être limiter le facteur de compression à environ 1/6.

Dans le cas des niveaux supérieurs de la hiérarchie EHRI, il est nécessaire de prévoir un facteur de compression de 300-500 pour pouvoir acheminer le signal. Pour un tel niveau de compression, il faudra attendre une percée technologique. Une solution pourrait résider dans un système de codage sur la base d'éléments connus actuellement à l'étude.

TABLEAU 15

Facteurs de compression requis pour la transmission

Hiérarchie image	Profil MPEG-2 4:2:2	EHRI-0 en temps réel	EHRI-1 en temps réel	EHRI-2 en temps réel	EHRI-3 en temps réel
Nombre de pixels effectifs	720 × 512 (525) 608 (625)	1 920 × 1 080	3 840 × 2 160	5 760 × 3 240	7 680 × 4 320
Rapport de fréquence d'échantillonnage	4:2:2	4:2:2	4:2:2	4:4:4	4:4:4
Gradation (différence de luminance en fonction des couleurs) (bits)	8	10	10	12	12
Cadence d'image	30	60	60	60	60
Débit binaire du signal source (Gbit/s)	0,216	2,5	10	40	72
Débit de transmission (Mbit/s)	5-50	60-80	100-150	150-600	150-600
Facteur de compression	20-40	30-40	70-100	70-270	120-480

4 Relation entre les systèmes EHRI et LSDI

L'imagerie numérique sur grand écran (LSDI) est une famille de systèmes d'imagerie numérique qui peuvent être utilisés pour des programmes tels que des séries télévisées, des pièces de théâtre, des manifestations sportives, des concerts, des événements culturels, etc., de la production à la présentation sur grand écran avec une qualité haute résolution dans des salles de cinéma, des salles de spectacle ou d'autres lieux convenablement équipés. Pour de plus amples informations sur la définition et l'application de l'imagerie LSDI, voir le Rapport UIT-R BT.2053 – Imagerie numérique sur grand écran.

L'UIT-R a recommandé une série de formats d'image en bande de base pour les applications LSDI. Le Tableau 16 montre leur correspondance avec les formats EHRI. Une hiérarchie étendue de systèmes LSDI utilise le format d'image EHRI-1(3 840 × 2 160) ou EHRI-3(7 680 × 4 320) comme décrit dans la Recommandation UIT-R BT.1769 – Valeurs de paramètre pour une hiérarchie étendue de formats d'image LSDI pour la production et l'échange international de programmes. De grandes parties des domaines techniques de la hiérarchie étendue des systèmes LSDI et des systèmes EHRI se chevauchent. Le Rapport UIT-R BT.2053 contient aussi des informations techniques sur la hiérarchie LSDI, y compris sur la hiérarchie étendue.

TABLEAU 16

Correspondances entre les formats EHRI, TV et LSDI

Hiérarchie EHRI(1)	Format d'image	Recommandation relative à la télévision	Recommandation relative à l'imagerie LSDI
EHRI-0	1 920 × 1 080	Rec. UIT-R BT.709	Rec. UIT-R BT.1680
EHRI-1	3 840 × 2 160		Rec. UIT-R BT.1769
EHRI-2	5 760 × 3 240		
EHRI-3	7 680 × 4 320		Rec. UIT-R BT.1769

⁽¹⁾ La classification des systèmes EHRI fait l'objet du § 1 du présent Rapport.

5 Paramètres

TABLEAU 17

Ensemble de paramètres applicables à l'EHRI

Paramètres	Valeurs
Format de projection	Le format supposé est le format 16:9, mais d'autres formats peuvent être envisagés pour diverses applications.
Résolution spatiale	En projection 16:9, une résolution de 1 920 × 1 080 ou d'autres valeurs multiples entières sont préférables. Il importe également que les pixels soient carrés.
Résolution temporelle	
Gradation	8 bits pour les images en mouvement et 10 bits pour les images fixes sont des valeurs minimales. Il pourrait être nécessaire de coder sur 12 bits pour les traitements évolués du signal (compositions, montage vidéo, utilisations secondaires).
Colorimétrie	Le système colorimétrique décrit dans la Recommandation UIT-R BT.709 pourrait convenir apparemment pendant un certain temps, mais il pourrait être nécessaire d'adopter une nouvelle méthode donnant une plus large gamme de reproduction des couleurs.