



## LE CINEMA NUMERIQUE

### RAPPORT DE STAGE

Etienne Traisnel

traisnel@enst.fr

Stage à la Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son sur le dossier «cinéma numérique».

#### INTRODUCTION

Depuis sa création voilà 100 ans, la technologie du cinéma a connu une remarquable longévité. Si des avancées majeures comme l'apparition du son ou de la couleur ont révolutionné ce média, la bobine de film argentique a toujours été son support de base.

Depuis plus d'un an, est annoncé l'avènement du «cinéma numérique».

Qu'entend-on derrière cette appellation ? Recourir aux technologies numériques pour créer, distribuer et projeter des films dans les salles de cinéma.

Si cette mutation est souhaitée transparente pour le spectateur, elle implique de profonds changements dans la chaîne de production, de distribution et d'exploitation des films. Des technologies nouvelles ainsi qu'une économie repensée sont à mettre en place.

D'ors et déjà des expériences ont eu lieu de par le monde. Elles sont en train de s'intensifier. Citons les plus significatives :

- Octobre 99 : George Lucas sort «Star Wars I» en numérique dans 4 salles aux Etats-unis
- Janvier 2000 : Disney sort «Toy Story II» en numérique dans 31 salles dont une en France
- Septembre 2000 : Gaumont sort les «Rivières Pourpres» en numérique dans une salle à Paris

Les équipements qui constituent la chaîne technique du cinéma numérique profitent largement des avancées technologiques de l'audiovisuel numérique, de l'informatique et des réseaux haut débit. Notamment, l'apparition de la télévision numérique haute définition permet de fournir au cinéma numérique des images de qualité compatible avec la projection sur grand écran.

En France, la CST (Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son) suit au plus près le dossier du cinéma numérique. Elle assure avec de nombreux partenaires une veille technologique, des démonstrations aux professionnels, une expertise technique et la rédaction de prescriptions techniques. Une plate-forme d'expérimentation des moyens de production, de distribution et d'exploitation du cinéma numérique a d'ailleurs été mise en place en collaboration avec France Télécom.

Dans ce présent rapport, on trouvera l'état de l'art actuel des technologies mises en place dans une chaîne de cinéma numérique. Des notions techniques viendront étayer cette présentation et permettront de comprendre les besoins spécifiques au cinéma numérique.

Un compte rendu des activités de la CST auxquelles j'ai participé ainsi que les travaux du groupe de travail «cinéma numérique» (siégeant à la CST) compléteront ce rapport.

**INDEX****LA CHAINE DU CINEMA NUMERIQUE**

1. **PRODUCTION**
  - 1.1. TYPES DE CAMERAS
  - 1.2. GRANDEURS CARACTERISTIQUES
2. **POSTPRODUCTION**
  - 2.1. NUMERISATION DE LA POSTPRODUCTION
  - 2.2. POSTPRODUCTION NUMERIQUE DES FILMS
3. **DIFFUSION**
  - 3.1. DIFFUSION TRADITIONNELLE
  - 3.2. DIFFUSION ELECTRONIQUE
4. **EXPLOITATION**
  - 4.1. STOCKAGE
  - 4.2. PROJECTION
5. **GLOSSAIRE TECHNIQUE**
6. **REFERENCES**

**COMPTES RENDUS DE LA PLATE-FORME D'EXPERIMENTATION**

1. **PROJECTION NUMERIQUE DU FILM « VOYAGES »**
2. **TRANSFERT 35MM → NUMERIQUE DU FILM « VOYAGES »**
3. **VISITE DU CENTRE DE POSTPRODUCTION NUMERIQUE DU GROUPE DUBOI**
4. **MISE EN PLACE D'UNE CHAINE DE DIFFUSION DE CINEMA NUMERIQUE AU CETEC**
5. **PROJECTION NUMERIQUE DU SECOND TRANSFERT DU FILM « VOYAGES »**
6. **PROJECTIONS PARALLELES 35MM / NUMERIQUE AU CONGRES DE LA FNCF 2000**
7. **PROJECTION NUMERIQUE AUX RENCONTRES CINEMATOGRAPHIQUES DE BEAUNE**
8. **MESURE DES CARACTERISTIQUES DU PROJECTEUR DLP CINEMA DE L'AQUABOULEVARD**
9. **MESURES DES CARACTERISTIQUES DU PROJECTEUR ELM R12 AU CETEC**

**COMPTE RENDU DES REUNIONS DU GROUPE DE TRAVAIL « CINEMA NUMERIQUE »**

1. **TECHNOLOGIES**
  - 1.1. TRANSFERT
  - 1.2. TRANSMISSION
  - 1.3. DIFFUSION
  - 1.4. TABLEAU RECAPITULATIF
2. **ACTIVITES CST**
  - 2.1. DEMONSTRATIONS
  - 2.2. EXPERTISE TECHNIQUE : PLATE-FORME FT-CST PROJET PRIAMM
  - 2.3. PRESCRIPTIONS CINEMA NUMERIQUE
3. **COMPTES RENDUS MANIFESTATIONS**
  - 3.1. EN FRANCE
  - 3.2. A L'ETRANGER
4. **LIENS AVEC LES AUTRES ORGANISMES**
  - 4.1. EN FRANCE
  - 4.2. A L'ETRANGER

## LA CHAINE DU CINEMA NUMERIQUE

### PREAMBULE

Les pages qui suivent font la présentation d'une chaîne de cinéma numérique. Elles ont pour but de préciser ce que cache l'appellation «cinéma numérique» aujourd'hui, en 2001. Il est possible de se faire une idée du cinéma de demain ; mais les techniques et les matériels qui le constitueront ne sont pas tous définis et les directions qui seront prises sont loin d'être toutes connues. C'est pourquoi ce document ne cherche pas à être exhaustif, mais préfère s'attacher à quelques principes de base.

#### **ARGENTIQUE ET NUMERIQUE : LUTTE OU COMPLEMENTARITE ?**

Très probablement, le basculement de techniques traditionnelles vers des techniques issues du numérique se fera sur plusieurs décennies. Pendant cette période, il sera nécessaire aux mondes argentique et numérique de cohabiter. Ils le font d'ores et déjà, par exemple au niveau de la postproduction pour le traitement des effets spéciaux. À l'opposé, certains maillons de la chaîne du cinéma sont destinés à un avenir tout numérique (distribution, exploitation). De façon à faire un parallèle avec les évolutions apportées par le numérique, la description ci-dessous n'oublie pas les techniques traditionnelles.

#### **NUMERISATION DU SON**

Rappelons que le son du cinéma est déjà passé au numérique à tous les niveaux : depuis l'enregistrement jusqu'à la lecture dans les salles de cinéma. Les problèmes ne sont évidemment pas les mêmes que ceux rencontrés dans le domaine de la vidéo. La numérisation du son est maîtrisée depuis plus de 20 ans. La quantité d'information ne pose aucun problème au vu des capacités de stockage numérique actuelles. La compression du signal sur les voies audio a même permis l'introduction du son multi-canal. Parce qu'il ne présente aucun frein à l'arrivée du cinéma numérique, le son ne sera pas traité dans ce document.

#### **TERMES TECHNIQUES**

Les termes techniques qui figurent en gras dans le texte sont expliqués et détaillés dans le glossaire technique.

## 1. PRODUCTION

Cinéma numérique ne veut pas forcément dire : utilisation de caméras numériques. Le mode de captation des images doit pouvoir être indépendant des technologies situées en aval de la chaîne. L'outil le mieux adapté sera celui qui répond aux souhaits artistiques du réalisateur.

### 1.1. TYPES DE CAMERAS

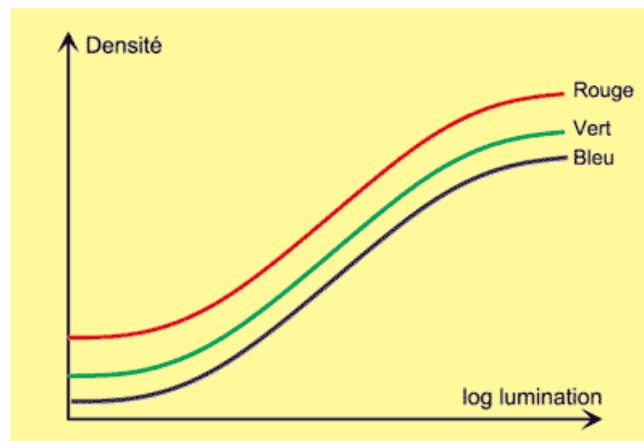
#### 1.1.1. CAMERA FILM

Le film est le support le plus utilisé dans la production cinématographique. Cette technologie est la plus ancienne et la mieux maîtrisée par les opérateurs.

Il existe plusieurs formats de pellicule : 16mm, 35mm, 70mm. Le tournage en 35mm reste le plus fréquemment utilisé. Sous cette rubrique, nous nous intéressons aux caractéristiques du film négatif 35mm. Ses caractéristiques sont différentes de celles du film des copies de série, également de largeur 35mm, mais destinées à passer dans les projecteurs des salles de cinéma.

Voici un extrait du dossier technique de la CST sur le «film et le futur de la captation des images» (disponible sur [www.cst.fr](http://www.cst.fr)) détaillant les caractéristiques du film négatif :

*D'abord, la qualité du film, ce que certains appellent le «film look», le «rendu film». C'est ce qui distingue les images argentiques des images électroniques. Cela vient de la façon dont le film capture les images. Le film utilise des capteurs répartis aléatoirement formés de cristaux d'halogénure d'argent. Les cristaux d'halogénure d'argent sont exposés à la lumière et réagissent avec le révélateur pour former de l'argent métallique. Ce développement est l'équivalent d'une amplification du signal. Quelques photons capturés par un cristal sont transformés en millions d'atomes d'argent métal. Le processus continu, ajoutant un certain nombre de facteurs. Les colorants réels stockent et reproduisent les formes de la scène, ses couleurs et sa luminance. La science qui nous aide à mesurer comment les émulsions photographiques répondent à l'exposition et au traitement s'appelle la Sensitométrie.*



Caractéristique sensimétrique d'un film couleur

*Une courbe sensimétrique trace la densité du film en fonction de l'exposition. L'utilisation d'une échelle logarithmique permet de mieux représenter l'importance relative des basses et hautes expositions. Pour étendre ses possibilités de capturer des différences de niveaux très faibles, le film emploie des couches multiples avec différentes tailles de cristaux d'halogénure d'argent. C'est comme si on utilisait trois capteurs dans des gammes différentes qui se recouvrent parfaitement. Le résultat est que le film a une très large latitude d'exposition. Il peut capturer simultanément les plus hautes lumières et les ombres les plus profondes. Et, tant dans les ombres que dans les hautes lumières, le film peut reproduire les variations de teintes les plus subtiles. Pour représenter cette gamme dynamique, 12 à 14 bits seraient nécessaires. Les émulsions sont enduites sur le film en plusieurs couches pour augmenter la latitude d'exposition. Dans un film couleur,*

ce système est répété 3 fois, une fois pour chacune des couleurs primaires. L'enregistrement parfait de la couleur est réalisé. En raison de sa grande dynamique et latitude de pose, le film peut reproduire une gamme étendue de couleurs et des variations de tonalité subtiles. L'équivalent de plusieurs milliards de couleurs.

Il y a également la question de résolution. Le film de 35mm capture 6 fois la résolution de la HDTV. La réponse en fréquence d'un film, sa fonction de transfert montre qu'il y a encore des détails lors d'une numérisation à 4000 points par 3000 lignes. C'est vrai même avec les films les plus sensibles. Il n'y a qu'à comparer la taille relative d'une image film de 35mm et d'un capteur CCD utilisé dans une caméra HDTV pour comprendre. Ainsi n'importe quel film négatif a déjà plus qu'assez de qualité et de résolution, pour répondre aux besoins de n'importe quel système avancé de télévision, y compris les formats haute définition numérique de la diffusion du futur. C'est pourquoi les films de long-métrage, particulièrement ceux aux formats larges, et les téléfilms produits sur support pellicules, seront si importants pour la programmation des futures chaînes HDTV. A l'inverse, les programmes qui sont convertis dans des formats courants, tels que le NTSC ou le PAL, ne peuvent pas fournir la qualité améliorée que les futurs systèmes exigeront. L'information visuelle est simplement absente.

### 1.1.2. CAMERA NUMERIQUE HD 24P

Cette caméra repose sur la norme **TVHD 1080/24p**. La fréquence de 24Hz et le mode progressif permettent de fournir des images directement utilisables dans une chaîne de cinéma numérique.

Actuellement, le seul modèle utilisé sur des tournages de cinéma est le caméscope numérique **HDCam** de Sony. La société Panavision, spécialiste des caméras film, propose une déclinaison de ce caméscope pour le cinéma (optiques spécifiques, ergonomie repensée etc...). «Star Wars» de George Lucas et «Vidocq» de Pitof seront les premiers films à l'utiliser.

Un tournage avec ce type de caméras diffère peu d'un tournage en 35mm. Par contre, le faible coût du support numérique à comparer à celui du film négatif permet l'augmentation du nombre de rushs. Un autre intérêt provient de la possibilité de visionner immédiatement ces rushs.

Pour le caméraman, de nouvelles habitudes (issues de la vidéo) sont à prendre. Quelques points sont détaillés dans le dossier technique de la CST «la HD numérique et le 24p» :

*Peter Wilson, de Snell & Wilcox, a énuméré les avantages et les inconvénients du 24p. Au tournage, les longueurs focales liées à la faible taille du capteur CCD ne favorisent pas l'obtention d'une profondeur de champ réduite, d'autant que le séparateur optique RVB limite l'ouverture maximale à 1,6. Le viseur électronique ne permet pas le cadrage du hors champ comme un viseur optique de caméra film. De plus, il montre l'effet stroboscopique du 24 Hz. Les solutions sont l'utilisation d'optiques à grande ouverture, accompagnées de filtres de densité neutre en cas de forte intensité lumineuse et la mise au point de caméra avec viseur optique.*

### 1.1.3. CAMESCOPE DV

Ce sont des caméscopes vidéo dont le format d'enregistrement est le **DV**.

Des réalisateurs comme Lars Von Trier ou Thomas Vinterberg ont utilisé des caméscopes numériques grand public **DV** pour alléger le tournage de leurs films et privilégier le jeu des acteurs. Ils doivent alors se contenter d'une image vidéo standard de qualité moyenne. Un lourd travail de postproduction est nécessaire pour rattraper les imperfections du tournage.

Attention ! Trop souvent, le terme «cinéma numérique» est utilisé pour évoquer les tournages avec un caméscope **DV**. Une chaîne de cinéma numérique peut inclure un tournage en **DV**, mais ne s'y résume pas.

## 1.2. GRANDEURS CARACTERISTIQUES

L'industrie de la vidéo et celle du film utilisent des grandeurs différentes pour mesurer les caractéristiques de leurs supports d'enregistrement d'images. Néanmoins, ces paramètres restent comparables. En voici les terminologies :

| Vidéo        | Film   |
|--------------|--|
| Sensibilité  | Indice d'exposition<br>Vitesse                           |
| Résolution   | Pouvoir résolvant<br>Fonction de modulation de transfert |
| Colorimétrie | Reproduction des couleurs                                |
| Dynamique    | Courbe sensitométrique                                   |
| Bruit        | Granularité  |

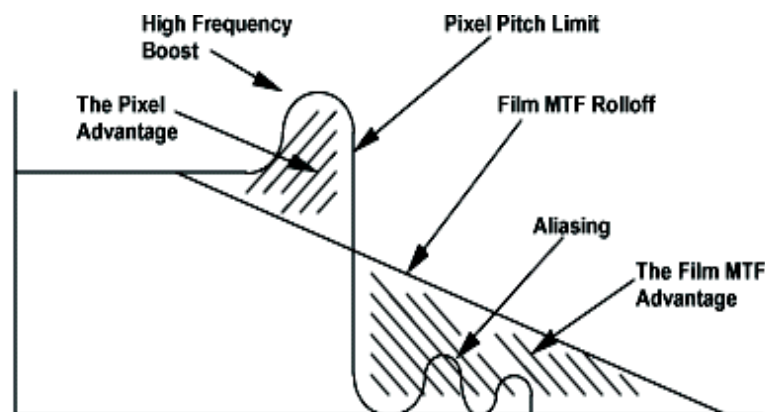
En se basant sur les grandeurs caractéristiques de la définition (résolution, fonction de modulation de transfert) et de la dynamique (Dynamique, courbe sensitométrique), il est possible de faire une première comparaison entre la caméra film et la caméra numérique HD 24p.

Le caméscope **DV** ne sera pas pris en compte car il ne peut rivaliser en terme de qualité. Il restera probablement un moyen de production de niche.

### 1.2.1. DEFINITION

La définition des images produites par les caméras peut se mesurer de plusieurs façons. Par exemple, pour les systèmes à matrice, une grandeur significative est la résolution (nombre de pixels par ligne, multiplié par le nombre de lignes). Cette grandeur n'a par contre aucun sens dans le domaine argentique.

La fonction de transfert de modulation (MTF) représente le niveau de blanc maximum d'une image obtenu en filmant une mire constituée de lignes noires et blanches d'épaisseurs variables. Elle exprime le **contraste** en fonction de la fréquence spatiale. C'est cette courbe que nous prendrons en compte pour mesurer la définition des systèmes de captation des images, mais aussi de reproduction des images.



Film MTF Rolloff vs. Pixel Raster

Sur ce graphe, sont représentées les MTF du film et d'un système de vidéo numérique.

La vidéo numérique étant limitée en résolution par le nombre de pixels, il est d'usage courant de favoriser la MTF à l'approche de la fréquence limite. En dessous de cette fréquence, les systèmes de vidéo numérique (dont la MTF peut rester constante) prennent l'avantage sur le film. Par contre, ce-dernier est le seul à proposer des détails dans les fréquences supérieures.

Avec un système de captation muni de 5000 pixels par ligne, la MTF de la vidéo numérique pourrait couvrir le même spectre que celle du film. Serait-il alors préférable de conserver une amplitude maximale le long des fréquences spatiales ou d'imiter la MTF du film qui offre un **contraste** plus doux ?

### 1.2.2. DYNAMIQUE

Par dynamique, on entend la capacité des caméras à proposer une plage de niveaux de gris la plus étendue possible. Un système de captation proposant une grande dynamique permettra l'obtention d'images fortement contrastées. Il permettra également au réalisateur de s'aventurer dans le tournage de scènes sombres ou très éclairées.

Pour les caméras numériques, la dynamique dépend du nombre de bits de quantification attribué à chaque pixel ainsi que de la forme de la courbe de transfert du signal vidéo. Dans le cas du format vidéo **1080/24p**, la voie de luminance est codée sur 10 bits et chacune des deux voies de chrominance sur 8 bits.

En argentique, c'est la courbe sensitométrique, présentée plus haut, qui caractérise la dynamique des images produites par les caméras film.

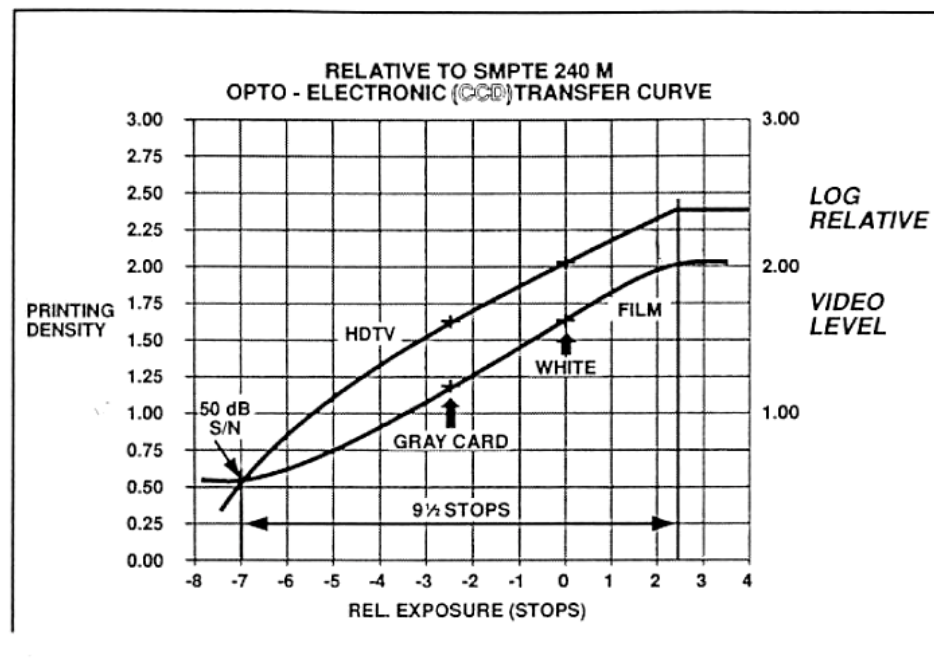


Figure 26. Comparison of SMPTE 240M optoelectronic transfer curve (HDTV CCD camera) with transfer curve of Eastman color negative film (green record).

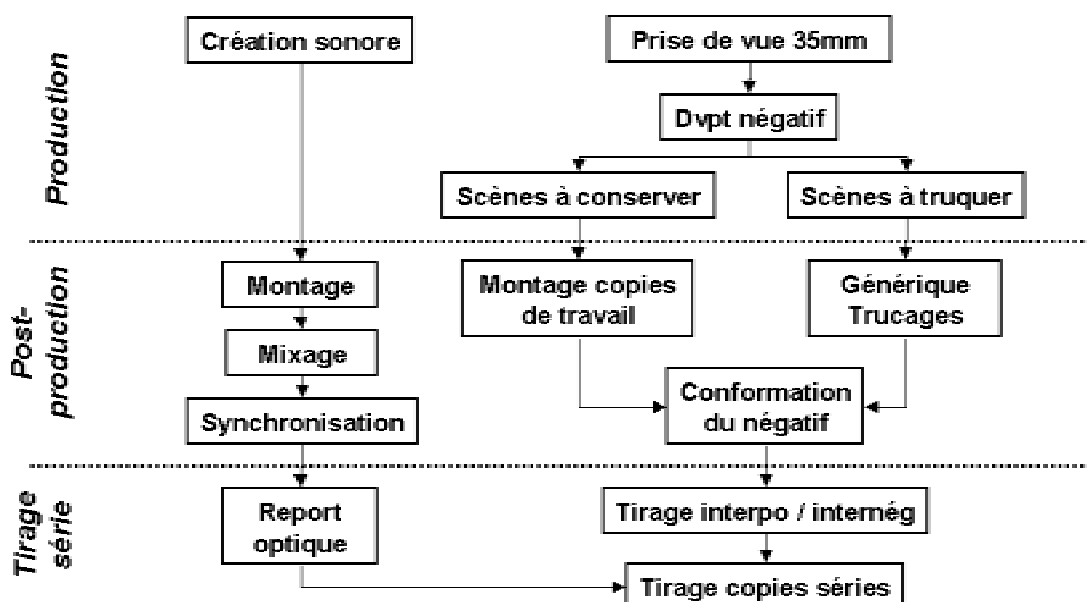
Ce graphe compare la courbe sensitométrique d'un film négatif Kodak et la fonction de transfert d'une caméra à capteur CCD HD. Il apparaît que les deux supports sont tout à fait comparables pour les expositions moyennes et fortes (environ 2,5 diaphs de latitude au-dessus du blanc de référence).

Par contre, le film affirme sa supériorité dans le pied de courbe. En effet, il est capable de restituer des détails dans le noir alors que la vidéo a dépassé le seuil limite de 50 dB de rapport signal à bruit. La latitude du film à l'exposition, plus grande que celle de la vidéo HD numérique, permet une plus grande marge de manœuvre au niveau de la postproduction.

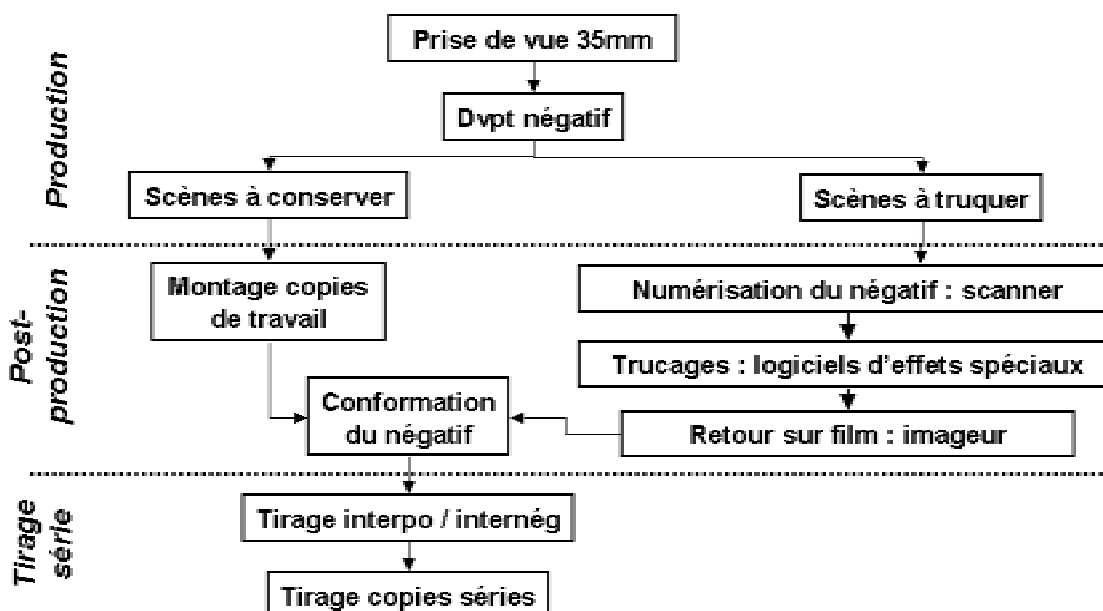
## 2. POSTPRODUCTION

### 2.1. NUMERISATION DE LA POSTPRODUCTION

#### 2.1.1. FABRICATION TRADITIONNELLE DES FILMS



#### 2.1.2. NUMERISATION POUR LES BESOINS DES EFFETS SPECIAUX



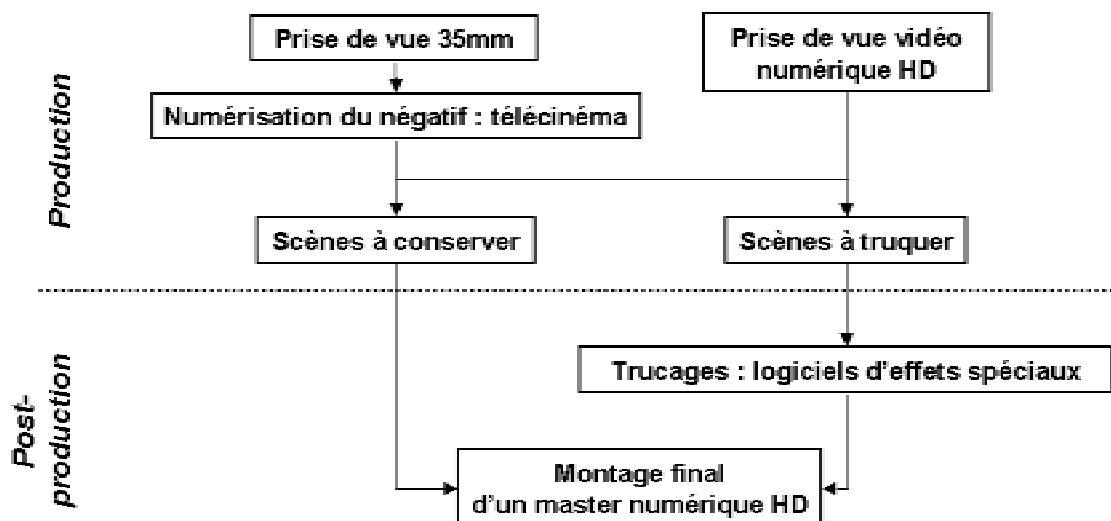
Avec l'arrivée des effets spéciaux traités par ordinateur, la postproduction a été le premier maillon de la chaîne du cinéma à s'attaquer à la numérisation des images.

Pour ce faire, les plans à truquer sont scannés et mis sous forme de fichiers d'images. La résolution de captation, dite 2K, varie de 1920 à 2048 points par ligne. Le format

d'encodage le plus utilisé est le CINEON (10 bits log) de Kodak où les informations de chaque canal (R,V,B) sont codées sur 10 bits selon une loi logarithmique.

Ces fichiers de données non compressées sont ensuite livrés aux logiciels d'effets spéciaux. Une fois les traitements effectués, un imageur recrée les images sur un support 35mm pour la conformation du négatif.

### 2.1.3. NUMERISATION TOTALE



## 2.2. POSTPRODUCTION NUMERIQUE DES FILMS

### 2.2.1. MASTERING

Pour assurer l'interopérabilité entre les équipements de postproduction, mais également de distribution ou d'exploitation des films, il a été nécessaire de définir un format pour le signal contenant l'information visuelle et sonore. Ce format, appelé **1080/24p**, est issu de la **TVHD** numérique dont les premiers équipements sont apparus à la fin des années 90. Il a également été adopté pour la production dans le cas des tournages avec une caméra numérique HD.

### 2.2.2. TELECINEMA

En amont de la postproduction, si les images proviennent d'une caméra film, on utilise un télécinéma afin de numériser l'information.

Cet appareil prend en entrée des bobines de film 35mm et propose en sortie un signal vidéo à la norme désirée (ici le **1080/24p**). A la différence des scanners qui sont utilisés dans le traitement des effets spéciaux, il travaille en temps réel.

Les télécinémas actuels comme le Spirit Data Cine de Philips proposent, sur la base d'un châssis commun, différents types de cartes : 2K, HD ou vidéo standard.

Philips propose par ailleurs un complément au télécinéma : le Virtual Data Cine. Il permet d'enregistrer sur des disques durs les informations numériques issues d'un télécinéma ou d'un magnétoscope. Ces informations seront ensuite utilisées pour l'étalonnage ou le montage.

### **MONTAGE**

Lors du montage d'un film, l'informatique est utilisée pour les avantages du montage virtuel. Les bobines des scènes retenues après visionnage des rushes sont transférées en vidéo standard (basse définition) par télécinéma. Elles sont ensuite mises à la

disposition du logiciel de montage. Après validation sur un moniteur, on récupère la liste temporelle des points d'entrée et de sortie sur chaque plan pour les reporter sur le négatif.

Avec l'arrivée du numérique, il est maintenant possible de conformer un film de manière entièrement automatique et numérique. Grâce à un télécinéma 2K (par exemple : Spirit ou C-Reality), les prises retenues sont numérisées et enregistrées sur un système à disques durs très haute capacité (télécinéma virtuel). La liste des points de montage (EDL) est transférée du montage virtuel au télécinéma virtuel, qui effectue la conformation. Les effets réalisés et calculés sur stations haut de gamme (Inferno) en fonction de leur nombre et de leur complexité sont insérés sous forme de fichiers 2K dans le télécinéma virtuel. Le film peut alors être étalonné sur une console numérique Pandora ou Da Vinci.

### 2.2.3. ÉTALONNAGE

Pour étalonner un film de façon traditionnelle, l'opérateur dispose de peu de marge de manœuvre. Il peut jouer sur les trois composantes rouge verte et bleue de l'image sur l'intégralité de celle-ci (sauf artifices délicats avec caches) Avec l'étalonnage numérique des films, utilisé depuis environ deux ans et pour quelques films seulement, les possibilités sont plus grandes. Tous les outils de retouche numérique d'images sont disponibles. Il peut être intéressant pour un réalisateur de procéder à des retouches colorimétriques localisées ou de modifier la saturation d'une image. Pour ce faire, une console d'étalonnage (par exemple la console Pandora Megadef qui accepte la vidéo HD) est accouplée au télécinéma (ou au télécinéma virtuel) et enregistre les modifications à apporter à chaque plan.

L'étalonnage de films destinés à la vidéo existe depuis longtemps pour la création de cassettes ou le pressage de DVD. Des prestataires équipés de matériel vidéo HD numérique sont donc capables de proposer un étalonnage numérique des films pour le cinéma. Il est alors important de prendre en compte le fait que le résultat final sera vu dans une salle de cinéma et non sur un moniteur même de bonne qualité. Par exemple, il est d'usage fréquent d'appliquer une correction de contour aux images destinées à la vidéo standard afin de les rendre plus nettes. Cette correction ne peut être conservée pour le cinéma, car elle est choquante sur grand écran. Il est donc recommandé de procéder à l'étalonnage avec une visualisation directe (que permet le numérique) sur grand écran.

### 2.2.4. ADAPTATION AU PROJECTEUR

Actuellement, le projecteur DLP Cinema développé par Texas Instrument est le seul utilisé dans les salles de cinéma numérique. Les matrices à micro miroirs qui le composent proposent une résolution inférieure à celle de la norme vidéo **1080/24p**. Comme le projecteur ne permet pas de recalculer les images, il est nécessaire que le master final soit adapté au projecteur. En fin de postproduction, les images sont donc ramenées à la résolution de 1280 pixels par 1024 lignes.

### 2.2.5. MODES D'ENREGISTREMENT

En fin de chaîne, quelles sont les possibilités pour stocker le master numérique ?

Tout d'abord, on peut l'enregistrer sur cassettes ; qui sont encore à l'heure actuelle le mode d'enregistrement favori de la vidéo. En ce qui concerne la **TVHD** numérique, les formats d'enregistrement disponibles sont :

- Le format **D5**, développé par Panasonic n'accepte pas le 24 Hz. Il n'est pas encore intéressant pour le cinéma.
- Le format **HDCam** que l'on retrouve dans les caméscopes présentés plus haut est la solution la plus répandue et la moins chère pour stocker sur cassette un master **1080/24p**, mais la définition de base est perdue (1440/480 soit 3 : 1 : 1).
- Le format **D6**, développé par Philips, (magnétoscope Voodoo) présente l'avantage de stocker la vidéo **1080/24p** sans compression.

Ensuite, il est possible d'enregistrer le master sur des supports de sauvegarde informatique. C'est la solution qui a été retenue par QuVis dont le serveur QuBit est

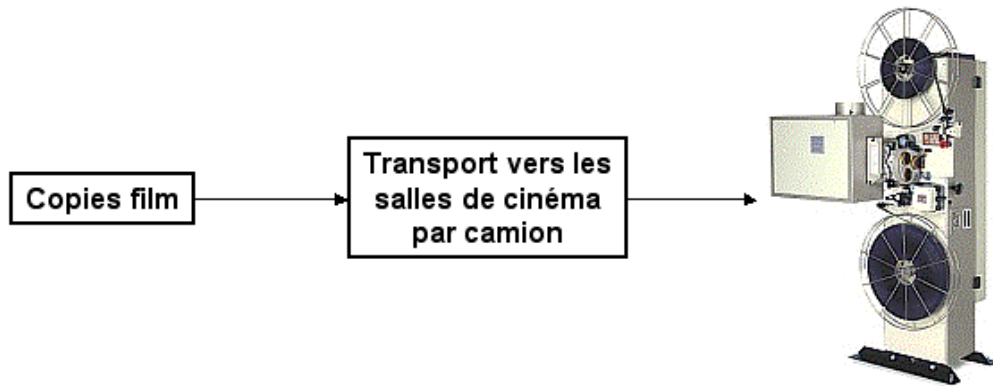


installé dans toutes les salles de cinéma numérique. Les films destinés à être joués sur ces serveurs sont encodés avec un format propriétaire (QPE) puis transférés sur des DVD ROM ou des cassettes Exabyte.

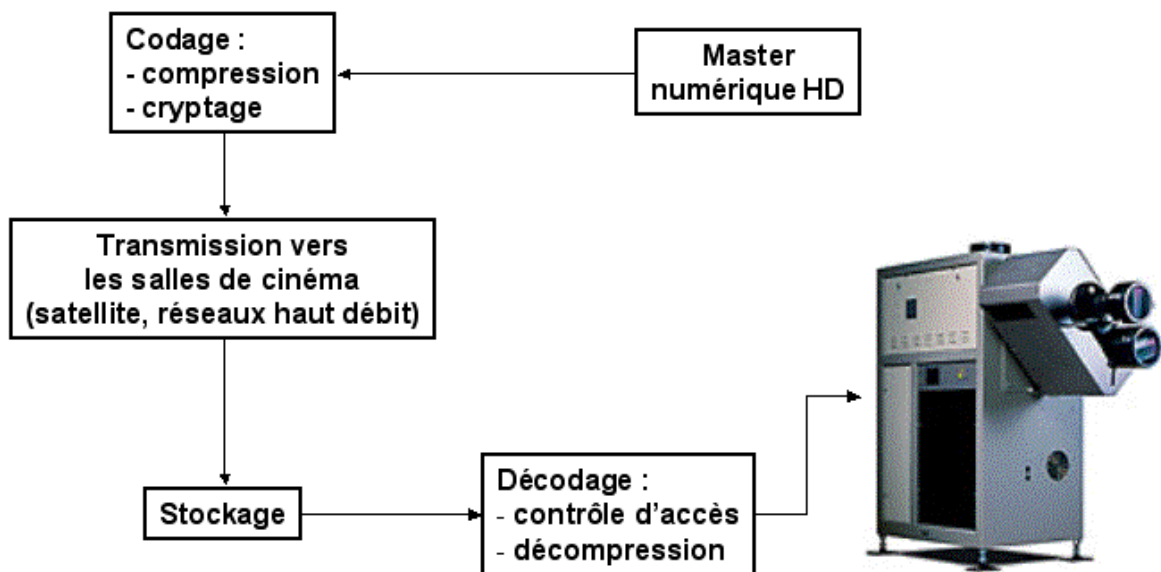
Enfin, il est possible de jouir de la capacité croissante de stockage des disques durs. Le serveur Origin 2000 de SGI permet d'enregistrer de la vidéo HD sans compression. Le serveur Cinestore de EVS le fait quant à lui avec une compression de type **MPEG-2**.

### 3. DIFFUSION

#### 3.1. DIFFUSION TRADITIONNELLE



#### 3.2. DIFFUSION ELECTRONIQUE



La diffusion électronique des films est certainement un des avantages principaux du cinéma numérique. Elle permettra de faire des économies substantielles (une copie film série coûte environ 10 000 francs et une transmission par satellite environ 100 000 francs) et générera une plus grande possibilité de programmation dans les salles de cinéma.

Mais, ce maillon de la chaîne est l'un des moins avancés sur le plan technique. Actuellement, les films exploités en numérique sont envoyés dans les salles de cinéma enregistrés sur des supports de sauvegarde informatique. Des transmissions de film par satellite ont eu lieu, mais dans le cadre d'expérimentations.

##### 3.2.1. COMPRESSION

Le débit de la vidéo HD numérique non compressée est gigantesque : 1,5 Gbit/s. Les travaux de compression du signal vidéo standard qui trouvent leur application dans la télévision par satellite ont montré qu'il est possible de conserver une bonne qualité d'image à de forts taux de compression. Les techniques de compression **MPEG-2** ou de compression par **ondelettes** sont applicables au cinéma numérique. Elles permettent

d'économiser de la bande passante lors de la transmission des films mais aussi de la place sur les appareils de stockage. Le mode de visualisation sur grand écran des films interdit au cinéma numérique d'utiliser des taux de compression aussi élevés que ceux pratiqués en télévision.

Un film dans sa version non compressée occupe de 1 à 4 To. Une fois compressé, il n'occupe plus qu'environ 50 Go. Dans le cas de la compression **MPEG-2**, le débit est fixe (50Mbit/s). Cette approche est issue de la contrainte temps réel de la télévision, contrainte que ne connaît pas le cinéma. C'est pourquoi Quvis, avec son serveur de vidéo HD QuBit, a choisi quant à lui de spécifier le rapport signal à bruit et de le maintenir constant sur la durée du film. Dans ce cas, le débit instantané dépend de la complexité de la scène. Deux films de même durée peuvent donc, après compression, donner des fichiers de tailles différentes. Un dessin animé comme « Toy Story 2 » composé d'images créées sur ordinateur tient sur 24 GO alors qu'il en faut 72 pour les « Rivières Pourpres ».

La société Qualcomm a développé un algorithme de compression à base de **DCT** : **ABSDCT** (Adaptive Bloc Size **DCT**). Il sera utilisé dans un serveur de vidéo HD destiné au cinéma numérique. À la différence de MPEG qui découpe l'image en blocs de 8\*8 pixels, **ABSDCT** autorise des tailles de blocs allant de 2\*2 à 32\*32 pixels. Cette technique permet d'allouer plus de place aux zones fortement détaillées et d'en gagner sur les zones uniformes.

### 3.2.2. SECURISATION

La sécurisation de l'information est incontournable. Un master numérique HD, s'il tombe entre de mauvaises mains peut ruiner la carrière d'un film (pressage de DVD, mise en réseau sur Internet).

La sécurisation repose tout d'abord, sur le **cryptage** du signal compressé. Les techniques de contrôle d'accès issues de la télévision par satellite sont pressenties. Si pour l'**embrouillage-cryptage**, il suffit d'adapter les techniques existantes aux débits du cinéma numérique, le problème est plus complexe au niveau de l'attribution des clefs de déchiffrement. Les droits de réception des films seront attribués à chaque salle pour chaque film. Un système de gestion des clefs centralisé est donc nécessaire. Les techniques de **PKI** semblent être une des solutions la plus appropriée à ce problème. Reste à savoir si l'organisme d'attribution des clefs sera international ou plutôt national (comme le sont les distributeurs de films actuellement).

Le **watermarking** ou tatouage pourrait bien être une technique de sécurisation complémentaire. Il ne peut pas empêcher le piratage des données, mais il permet d'insérer dans le flux vidéo des informations de copyright et de diffusion. Ainsi, si un film a été piraté avec un caméscope dans une salle de cinéma, comme c'est le plus souvent le cas, il sera possible de savoir où et quand il a été enregistré.

### 3.2.3. TRANSMISSION

Pour l'instant, les salles de cinéma numérique, très peu nombreuses (~30 dans le monde), sont approvisionnées en films par DVDRom ou cassettes exabyte destinées au serveur Qubit de Quvis.

C'est le transport par satellite qui semble être la solution de transmissions des films la plus simple et la moins chère. Il s'agit ici de transport de fichier, et non de transport d'un signal. En effet, la contrainte de temps réel n'existe pas pour le cinéma. Le film est téléchargé une fois pour toutes et peu importe le temps de la transmission dans une fenêtre de taille maximum. Mais certains prédisent l'arrivée de la retransmission d'événements « live » (matches, spectacles etc...) dans les salles de cinéma numérique comme source de revenus supplémentaires. Dans une telle configuration, le schéma de la transmission par satellite est à revoir ou à doubler.

Techniquement, le fichier est transmis par paquets (IP) encapsulés dans le format DVB (spécifique à MCast). Le film est ainsi transmis à toutes les salles de cinémas disposant de la clef de déchiffrement. Par une voie de retour à faible débit (ligne de téléphone), les salles de cinéma acquittent les paquets reçus et demandent la réémission des paquets perdus ou altérés. Ces paquets sont envoyés de nouveau à tous les cinémas n'ayant pas



reçu le film correctement. Il en va ainsi de suite jusqu'à réception intégrale du film dans tous les cinémas.

Actuellement, les protocoles de transport de fichier par satellite (par exemple : MCast de GlobeCast) ne sont utilisés que sur des débits relativement faibles : 6 Mbit/s. Il devrait rapidement atteindre 25 Mbit/s.

## 4. EXPLOITATION

### 4.1. STOCKAGE

Les serveurs de stockage des films seront le cœur du cinéma numérique. Ils permettront une programmation plus souple des salles sans les fastidieux déplacements de bobines d'un projecteur à l'autre. Par l'intermédiaire d'un logiciel de planification des salles comme il en existe déjà dans les multiplexes, l'opérateur choisira pour chaque salle le fichier image, le fichier son, les publicités et bandes annonces et éventuellement les sous titres. Le serveur QuBit permet déjà de télécommander les automatismes de la salle (ouverture des rideaux, lumières, musique...).

Pour sécuriser au maximum la chaîne, il est probable que la fonction de **contrôle d'accès** ne soit pas incluse dans le serveur, mais dans le projecteur directement.

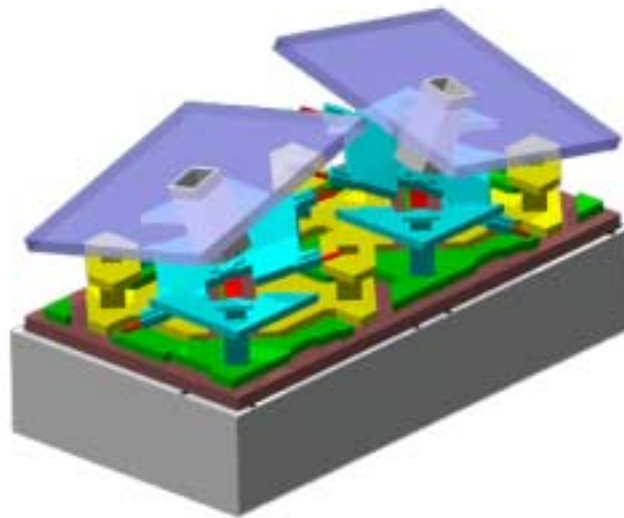
### 4.2. PROJECTION

#### 4.2.1. TECHNOLOGIES

L'arrivée sur le marché de projecteurs vidéos capables de reproduire des images avec une grande fidélité a été l'élément déclencheur de l'intérêt porté actuellement au cinéma numérique. On sait désormais qu'en terme de **contraste**, de colorimétrie, de résolution, ils n'ont pas à rougir de la comparaison avec le 35mm. Surtout, ils ne dégradent pas l'image au fur et à mesure des projections.

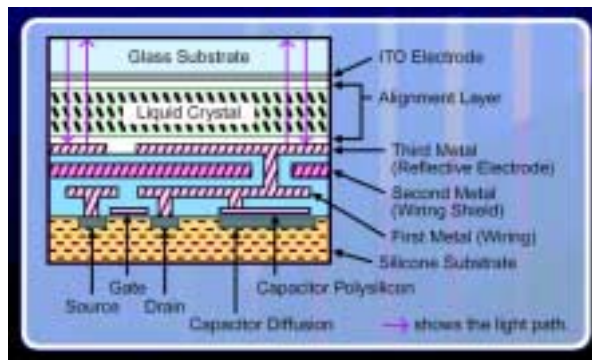
Trois technologies de projection numérique de films sont en avant scène :

#### **DLP (DIGITAL LIGHT PROCESSING) CINEMA**



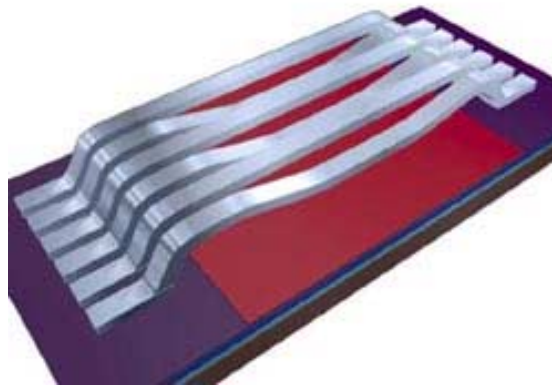
Cette technologie développée par Texas Instrument est la seule commercialisée à l'heure actuelle. Elle repose sur des matrices à micro miroirs ( $16\mu\text{m}^2$ ) qui oscillent à raison de 50000 battements par seconde. Cela permet de moduler l'intensité lumineuse de chaque pixel, pour chacune des trois couleurs primaires. On peut trouver de telles matrices dans des projecteurs grands publics, mais pour les besoins spécifiques du cinéma, TI a développé une puce spéciale dite « black chip ». Elle améliore le rendu des noirs et la fidélité colorimétrique. Ses dimensions, 1280\*1024 pixels (format 5/4) obligent un redimensionnement du signal qui « attaque » le projecteur. Un anamorphoseur optique est donc nécessaire pour restituer la variété des proportions d'images que possède le cinéma (du 1,33 au 2,35).

**DILA (DIRECT DRIVE IMAGE LIGHT AMPLIFIER)**



Cette technologie de JVC, met à profit la polarisation d'un cristal liquide pour autoriser ou non la réflexion de la lumière incidente sur une électrode réfléchissante.

**GLV (GRATING LIGHT VALVE)**



La firme californienne Silicon Light Machine, achetée par Sony, propose une technologie qui repose sur des réseaux de micro lamelles réfléchissantes. Lorsqu'elles sont excitées, par un procédé électrostatique, la lumière est diffractée.

**4.2.2. NORME**

Pour assurer au spectateur une qualité d'image la meilleure possible et que le rendu ne varie pas d'un cinéma à l'autre, il est nécessaire qu'une norme spécifie la courbe de transfert entre un signal numérisé et l'image projetée à l'écran.

## 5. GLOSSAIRE TECHNIQUE

### 1080/24P

Il s'agit de l'un des différents formats de vidéo haute définition numérique définie par la norme 274 M de la SMPTE et la recommandation 709 de l'ITU (voir le paragraphe concernant la **TVHD**).

24p signifie que les images sont jouées à la fréquence de 24 Hz en mode progressif (non entrelacé). En conséquence, ce format est compatible avec le cinéma dont la vitesse de défilement est de 24 images par secondes depuis qu'il est sonore. C'est donc naturellement qu'il s'est imposé comme standard de «mastering» du cinéma numérique.

Il est également envisagé comme un format de production pour la télévision. En effet, un film issu d'un master **1080/24p** peut être joué soit à 25 images par secondes pour les systèmes à 50Hz comme le Pal ou le SECAM, soit à 30 images par seconde, grâce au 3/2 pulldown, pour le NTSC. Une simple «down conversion» permet de réduire la résolution.

Voici les principales caractéristiques du format **1080/24p** :

- 1920 points par ligne
- 1080 lignes actives
- 24 images par secondes
- Progressif
- Codage Y, Cb, Cr
- 4 :2 :2 sur 10,8,8 bits
- Format 16/9
- Débit de 1,5 Gbit/s

Avec l'arrivée d'un nouveau support pour le cinéma, il est naturel remettre en question la fréquence historique de 24 Hz. Si dans un premier temps, il est nécessaire de conserver une compatibilité avec les équipements actuels, on peut imaginer que par la suite, le cinéma numérique sera à même de proposer un meilleur rendu des mouvements. Voici un extrait du dossier technique de la CST «la HD numérique et le 24p» qui traite du sujet :

*Comme l'œil a une réponse temporelle qui dépend de la brillance, le 48 hertz est tout à fait supportable en cinéma, mais 50 hertz en télévision c'est un peu juste. Quand on montre aux Américains des images faites en Europe, ils se plaignent du flicker insupportable. En projetant l'image film à 48 Hz, on répète deux fois chaque image. Comme l'œil suit involontairement le mouvement, le résultat est que l'œil perçoit une trépidation du fond (judder, en anglais). Ceci, dit-il, est une composante principale du fameux film look, qui est toujours difficile à définir. C'est un défaut irritant, mais qui est là depuis si longtemps, que certaines personnes pensent qu'il est une caractéristique fondamentale du film look. Pour réduire le judder, on veille à ne réaliser que des panoramiques lents et l'on tourne avec une faible profondeur de champ de façon à ce que le sujet en mouvement soit net mais se déplace sur un fond flou.*

*Les techniciens du cinéma ont intégré ces procédés par expérience, même si, au début ils n'en connaissaient pas la théorie. Des études faites au SMPTE ont démontré que, malgré les améliorations techniques de cent ans de cinéma, l'œil suit toujours le phénomène intermédiaire de l'image répétée deux fois. Si le mérite du 24p est le transfert en numérique sans dégradation supplémentaire, la conclusion est sévère : la fréquence de 24 hertz est inadéquate pour une présentation de haute qualité. La solution, c'est de monter en fréquence image. Le Showscan (film défilant à 60 images par seconde) l'a démontré : le résultat est magnifique, mais extrêmement coûteux. Avec le cinéma électronique, le 60 Hz sera peut-être envisageable à l'avenir.*

### 1080/24P SF

SF signifie «segmented frame». Dans ce format reprenant les caractéristiques du **1080/24p**, les lignes sont séparées en deux trames. Mais, contrairement à un système entrelacé, toutes les lignes d'une image ont été prises au même instant.

Pour créer un signal 24p SF, il suffit de reformater la vidéo progressive à 24 hertz 1 080 lignes, en deux trames de 540 lignes, avec un retard inévitable mais sans conséquence. Ceci permet de rendre la vidéo progressive semblable en structure temporelle à un signal entrelacé. L'intérêt, par exemple, est de visionner un signal **1080/24p** sur des moniteurs HD entrelacés fonctionnant à 48 Hz.

Le 24p SF n'a pas de format d'enregistrement propre. Il reprend celui du 24p. Les magnétoscopes HD offrent la possibilité de jouer une même cassette selon les 2 modes : progressif et segmenté.

### ACCES CONDITIONNEL

Système d'**embrouillage** et de cryptage des signaux destiné à n'en permettre l'accès qu'à certains destinataires. Ces spectateurs peuvent être des abonnés payants, appartenir à un pays ou à une région déterminée ou simplement disposer d'une Clé d'Autorisation.

### CONTRASTE

Le contraste d'une image est le rapport de la plus haute luminance de l'image sur la plus faible.

Le contraste d'un projecteur est le rapport du plus fort éclaircissement (blanc pur) pouvant être émis par le projecteur sur le plus faible (noir).

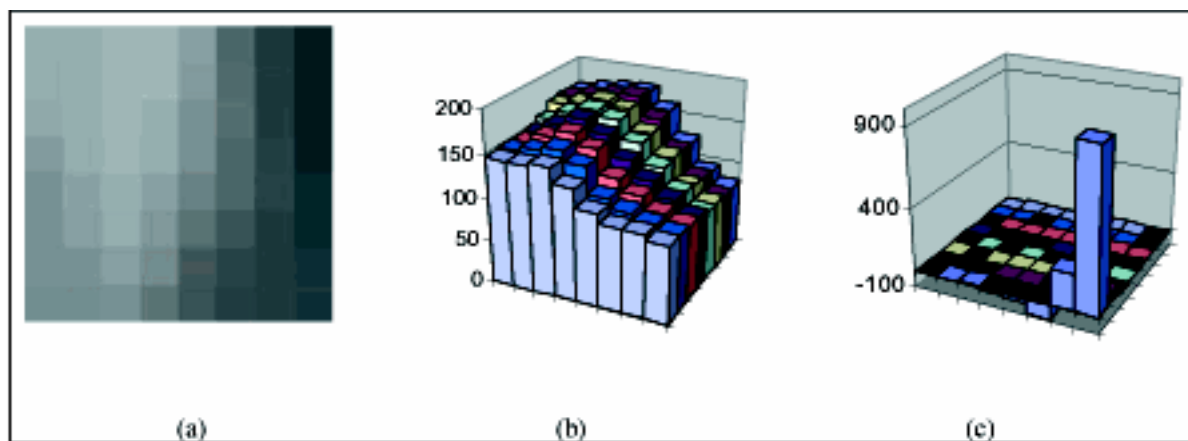
### CRYPTAGE

Processus de codage de données afin qu'un code spécifique ou une clef de décryptage soit exigé pour restaurer les données originales.

### DCT

La DCT (Discrete Cosine Transform) est une fonction mathématique qui transforme les données d'une image depuis le domaine spatial dans le domaine fréquentiel. Elle est notamment utilisée dans de nombreux systèmes de compression vidéo dont **MPEG-2**.

Voici sur un bloc de 8 pixels par 8 pixels les effets de cette transformation :



À ce stade, aucune information n'est perdue. Il est possible d'appliquer au résultat la fonction iDCT inverse. On récupère les niveaux de gris de l'image initiale.

On comprend aisément les avantages de cette transformation pour la compression : La plupart des coefficients de la DCT sont nuls. Des expérimentations ont montré que l'œil humain n'est pas sensible à une quantification grossière des coefficients correspondants aux hautes fréquences. Grâce à ce phénomène, il est possible de réduire davantage le débit (mais de façon irréversible).

Les coefficients sont lus suivant une loi dite en « zigzag » de façon à placer en tête ceux de plus fort poids (basses fréquences). L'emploi d'un codage à longueur variable (VLC) permet de compacter les groupes de zéros et d'affecter des codes plus courts aux codes les plus fréquents.

### DV

Ce format d'enregistrement numérique, destiné aux marchés grand public et professionnel, est né d'une coopération entre les principaux constructeurs de matériel vidéo. Il utilise des cassettes quart de pouce pour enregistrer des signaux 525/60 (4 : 1 : 1) ou 625/50 (4 : 2 : 0). Tous les modèles utilisent une compression « DV » intra-trame à base de **DCT** (5 : 1). La vidéo est quantifiée sur 8 bits à une fréquence d'échantillonnage (de la luminance) de 13,5 MHz et enregistrée à 25 Mb/s.

### EMBROUILLAGE

Transformation d'un signal numérique en un signal numérique aléatoire ou pseudo-aléatoire, de même signification et de même débit binaire en vue d'améliorer la transmission du signal sur un support donné.

### HDCAM

HDCam est un format d'enregistrement de vidéo numérique HD développé par Sony. Les magnétoscopes HDCam reprennent les principes de base du Betacam et utilisent des cassettes de même taille. Les différentes fréquences de la **TVHD** et en particulier le 24p sont acceptées.

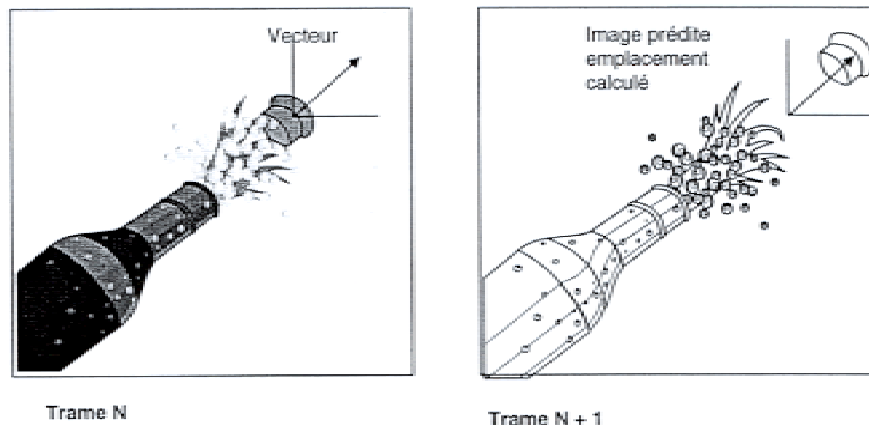
Pour réduire la bande passante, le signal subit d'abord décimation qui réduit le nombre de pixels par ligne à 1440. Puis chaque trame est comprimée selon un algorithme à base de **DCT**.

### MPEG-2

MPEG-2 est une norme de compression (ISO/IEC 13818) qui traite toutes les résolutions d'image depuis le SIF (1/4 d'image) jusqu'à la pleine haute définition. L'algorithme est un ensemble d'outils puissants basés sur les mêmes principes que MPEG-1 : **DCT** et compensation de mouvement.

Pour couvrir une telle gamme, MPEG-2 emploie différents profils et niveaux. Les profils définissent le jeu maximum d'outils utilisables. Les niveaux spécifient la résolution des images. Pour le cinéma numérique, ce sont les niveaux «High-1440 Level» (HD, 1140 pixels par ligne) et «High Level» (HD, 1920 pixels par ligne) qui sont utilisés.

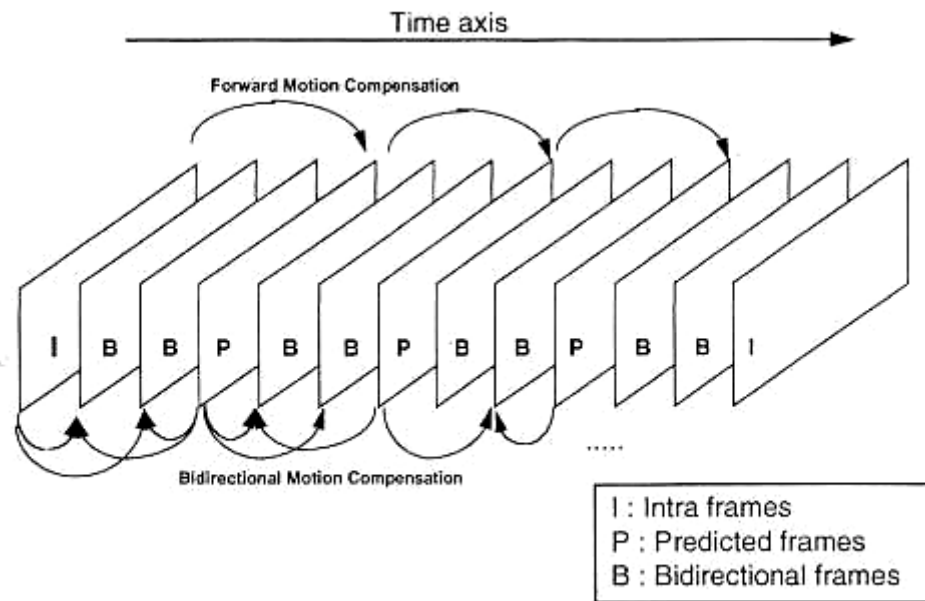
Dans un premier temps, l'image est découpée en blocs de 8\*8 pixels auxquels sont appliqués une compression à base de **DCT**. Une prédiction inter-image basée sur la compensation de mouvement exploite quant à elle la redondance temporelle.



Dans le codage MPEG-2, 3 types d'images sont employés :

- Les images I (Intra) qui sont codées sans référence à d'autres images. Ce sont les points d'accès où on recommence le décodage.
- Les images P (Prédicatives) sont codées en tenant compte de l'image I ou P précédente à l'aide de vecteurs mouvement.
- Les images B (Bidirectionnelles) qui utilisent à la fois les images passées et futures. Elles ont le taux de compression le plus élevé et ne propagent pas d'erreur car ne sont jamais utilisées en référence.

L'organisation des séquences employant les 3 types I, P, B est très flexible. Les images sont donc transmises suivant une séquence répétitive appelée GOP (Group Of Pictures).



MPEG Sequence : Group of Pictures GOP

Les profils de MPEG-2 s'appuient en partie sur la nature des images disponibles pour le codage :

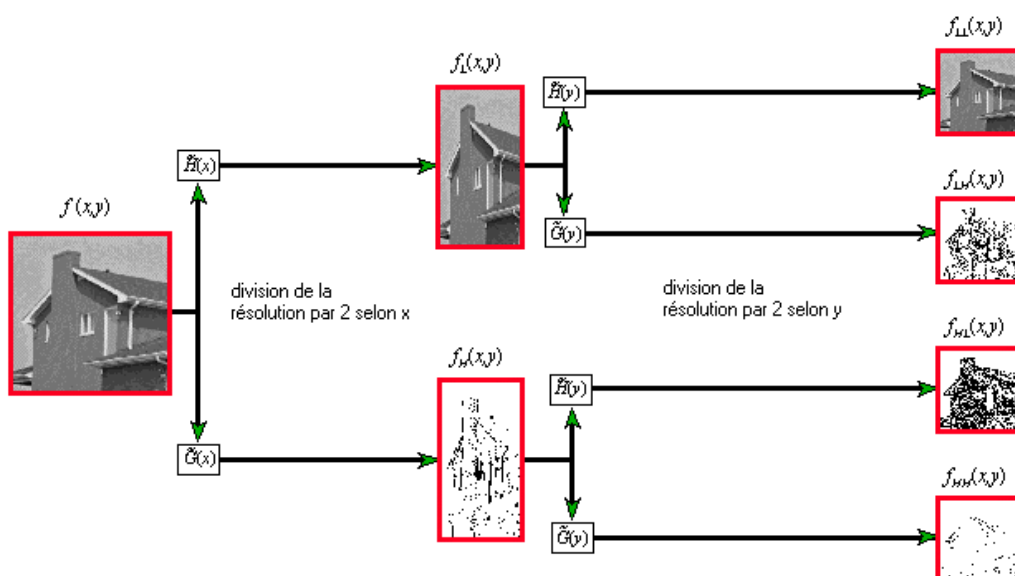
- «simple profile», le profil simple permet le codage d'images I et P.
- «Main Profile», le profil principal a tous les outils de profil simple et la prédiction bidirectionnelle B.
- «SNR scalaire Profile» et «Spatially scalaire profile» utilisent des outils qui permettent de coder en une couche de base ainsi qu'une ou plusieurs couches supplémentaires qui peuvent soit améliorer le rapport signal à bruit, soit la résolution
- «high profile» possède tous les outils précédents plus la capacité de coder les signaux de différence de couleur de type 4 :2 :2.

**ONDELETTES**

Les ondelettes ce sont d'abord une théorie mathématique récente d'analyse du signal, développée dans les années 80. Dans l'histoire des mathématiques, les séries de fourier ont marqué une avancée considérable en permettant d'approximer des signaux périodiques par une somme de sinus et de cosinus. La transformée par ondelettes est la décomposition d'un signal par une *ondelette mère* qui sera translatée et dilatée.

L'utilisation des ondelettes permet, entre autres utilisations, la compression de signaux et d'images. Une transformation par ondelettes consiste à décomposer un signal en une tendance grossière accompagnée de détails de plus en plus fins. Ainsi, pour reconstituer le signal avec une précision donnée, il suffira de connaître la tendance et les détails correspondant au niveau de précision recherchée et de négliger les autres.





Pour compresser une image, les opérations dans l'ordre sont :

- Un sous-échantillonnage de l'image dans le sens horizontal.
- Un calcul de l'erreur entre l'image originale et l'image sous-échantillonnée dans le sens horizontal.
- Pour chacune des 2 images obtenues, un sous-échantillonnage dans le sens vertical.
- Pour chacune des 2 images obtenues, un calcul de l'erreur dans le sens vertical.

On obtient une image dont la résolution est divisée par 2 et 3 images qui codent les erreurs entre l'image originale et l'image sous-échantillonnée. Cette transformation est répétée un certain nombre de fois avant quantification. Les détails inférieurs à un certain niveau sont abandonnés. Les valeurs restantes sont codées.

Cette méthode de compression autorise de faire la décompression d'une image de 2 façons différentes : sa résolution est fixe mais sa taille augmente progressivement, sa taille est fixe mais sa résolution augmente progressivement.

En conclusion, on retiendra que la méthode des ondelettes présente des taux de compression meilleurs que ceux de la **DCT** mais que l'électronique permettant sa mise en œuvre est plus compliquée.

## PKI

PKI signifie «Public Key Infrastructure». Cette technologie de sécurisation des données circulant sur un réseau provient du monde de l'informatique et plus précisément d'Internet.

Chaque interlocuteur a un jeu de deux clés : une publique et une privée. Tout le monde peut utiliser la clé publique de quelqu'un pour chiffrer un message. Mais seul le propriétaire détient la clé privée sur son poste pour le déchiffrer. Il est alors possible de s'échanger des données de façon sécurisée en utilisant la clé publique. Chacun est alors sûr que seul le destinataire pourra lire ce message.

Si cette technologie est facile à gérer pour des échanges individuels, elle pose plus de problèmes dans pour une utilisation au sein d'une organisation importante. Les infrastructures à clé publique, ou PKI sont destinées à répondre aux problèmes posés par la création des clés (certificats), leur gestion, ainsi que l'authentification des utilisateurs.

Une telle infrastructure est composée de plusieurs éléments. En premier lieu, elle comporte une autorité de certification. C'est elle qui est chargée de générer les certificats, en associant l'identité d'une personne ou d'un système à une signature numérique. On peut souligner que cette phase peut être réalisée en interne, ou confiée à un prestataire. C'est aussi l'autorité de certification qui veillera à révoquer les certificats à une date définie.

Le second élément est l'autorité d'enregistrement. Celle-ci capture et identifie l'identité des utilisateurs et soumet les demandes de certificats à l'autorité de certification.

Le troisième composant est constitué par le système de distribution des clés. Celles-ci peuvent ainsi être distribuées par l'intermédiaire d'un annuaire LDAP. Elles peuvent aussi être enregistrées dans des dispositifs physiques, et par exemple des cartes à puce.

### TVHD

La TVHD est un format vidéo aux proportions 16/9<sup>ème</sup> de résolution supérieure à celle de la télévision standard. Dans le courant des années 90, les Américains ont élaboré les normes de la TVHD numérique en s'inspirant du format de la NHK qui comportait 1920 pixels par ligne. Pour obtenir des pixels carrés, le nombre de lignes actives a été fixé à 1080. Cela a donné naissance au CIF (Common Interface Format) commun aux mondes 50 Hz et 60 Hz. En effet, ces deux fréquences (en mode progressif ou entrelacé) sont acceptées à côté du 24Hz utilisé pour le cinéma numérique.

Pour permettre de relier les matériels de TVHD numérique, la fréquence d'échantillonnage unique de 74,25 MHz a été choisie. C'est ce débit que supporte la liaison série HD-SDI (1,45 Gbit/s), normalisée par la SMPTE (292 M).

Le lancement aux États-Unis, de la diffusion d'émissions en HD numérique a permis l'essor de ce format et l'apparition de matériels adéquats.

### WATERMARKING

Le watermarking est un procédé qui permet l'insertion d'informations numériques (watermarks) dans les fichiers binaires que sont les images, sons, vidéo. On parle en français de tatouage ou d'insertion de filigranes.

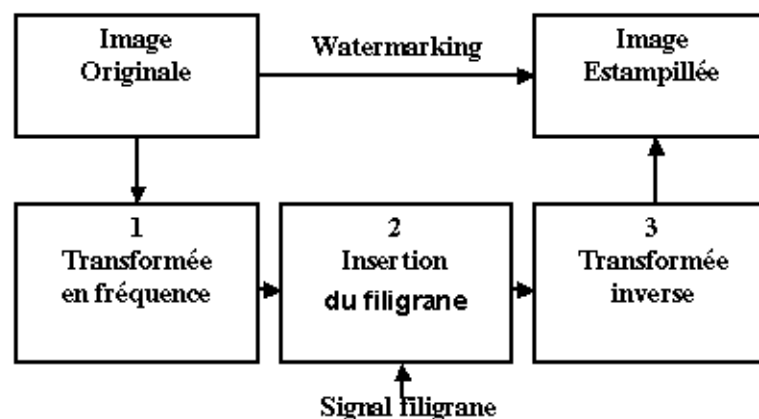
Les applications potentielles de tatouage des films sont essentiellement la protection du copyright. Le filigrane peut soit contenir des informations identifiant l'œuvre, soit des informations identifiant le destinataire ou le distributeur.

Les contraintes imposées au tatouage sont les suivantes :

- L'invisibilité à l'œil.
- La robustesse à la compression, aux dégradations induites par les équipements de transmission et plus généralement à n'importe quelle copie du support original.
- La fiabilité de la lecture : le taux de fausses alarmes doit être très faible.

Pour insérer un filigrane dans un flux vidéo, il est possible, soit d'appliquer des méthodes dérivées du tatouage des images, soit de prendre en compte l'aspect temporel des séquences (utilisation de vecteurs de mouvement). Il peut être également intéressant de répartir l'information de tatouage au cours du temps de manière à introduire de la redondance.

Dans le cas de flux vidéo compressés, il vaut travailler sur l'espace des données compressées plutôt que sur l'espace des pixels. On économise ainsi l'opération coûteuse de décompression / compression. Dans le cas particulier de la compression DCT, l'insertion de filigranes sur les coefficients des basses fréquences de l'image assure la robustesse du tatouage. Le choix de ces coefficients se fait aléatoirement à l'aide d'une clef secrète.



(1) - Transformée mathématique quelconque sur l'ensemble du document : DCT, ondelettes, transformations de Fourier (FFT), transformations d'Hadamard.

(2) - Insertion du filigrane modifiant certaines valeurs de cette transformée selon une loi mathématique donnée, en exploitant certaines propriétés des organes humains (sons faibles masqués par des sons forts, variations de couleur de pixels indécélables à œil, etc.);

(3) - Transformée inverse de cette nouvelle séquence pour obtenir le document tatoué.

## 6. REFERENCES

- « **COMPRESSION OF MOVING PICTURES FOR DIGITAL CINEAM USING THE MPEG-2 TOOLKIT** » : support de conférence de Mickael W. Burns et James T. Whittlesey donnée lors du congrès de la SMPTE d'octobre 2000
- « **FILIERE TRADITIONNELLE ET FILIERE VIRTUELLE** » : paru dans Sonovision novembre 2000
- « **HDTV AND FILM – ISSUES OF VIDEO SIGNAL DYNAMIC RANGE** » : article publié dans le journal de la SMPTE en octobre 91 par Laurence J. Thorpe
- « **LA COMPRESION NUMERIQUE MPEG-2** » : présentation d Bernard Tichit (Thomson Broadcast Systems) en mars 96
- « **LA HD NUMERIQUE ET LE 24P** » : dossier technique de la CST
- « **L'AN 01 DU CINEMA NUMERIQUE** » par Thierry Mahé : article paru dans Industries et Techniques n°822 janvier 2001
- « **LE CINEMA NUMERIQUE** » : présentation par Anne Luminet (TDF)  
SMPTE Digital Cinema Study Group DC28 Interim Reports
- « **THE DIGITAL FACT BOOK** » de Quantel
- « **THE FUTURE OF THE MOVING IMAGE** » : support de conférence de Gary Demos (DemoGraFX) donnée lors du congrès de la SMPTE d'octobre 2000
- « **TOUR D'HORIZON D'UNE CHAINE MPEG-2** » : présentation Tektronix mars 1999