



# Affichage. Visualisation - Projection et rétroprojection

Date de publication :  
**10 juin 2006**

Cet article est issu de : **Électronique - Photonique | Optique Photonique**

par **Thierry BOREL, Khaled SARAYEDDINE**

**Résumé** Depuis ses origines, la projection d'images a évolué considérablement, essentiellement grâce aux avancées des composants constituant l'ossature du projecteur. De nombreux systèmes de projection très différents ont ainsi vu le jour. Cet article débute par la présentation de la projection frontale et de la rétroprojection. Il s'attarde ensuite sur les technologies disponibles à ce jour (cristaux liquides, tubes cathodiques, éléments micromécaniques, projecteurs ILA et laser) en détaillant les avantages et les inconvénients de chacune des solutions.

## Abstract

**Pour toute question :**  
Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com  
**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **18/02/2020**

Pour le compte : **7200029571 - univ mouloud mammeri tizi ouzou // bu07 SNDL // 193.194.82.178**

# Affichage. Visualisation

## Projection et rétroprojection

par **Thierry BOREL**

Ingénieur de l'École supérieure d'électronique de l'Ouest  
Responsable des laboratoires de recherche Displays, Electronics and Tests et  
Signal Processing  
Thomson R&D France, division Corporate Research

et **Khaled SARAYEDDINE**

Ingénieur de l'École supérieure d'ingénieurs en électronique et électrotechnique  
Docteur en optique de l'université de Franche-Comté  
Responsable des études optiques au sein du pôle Displays  
Thomson R&D France, division Corporate Research

<b>1. Projection et rétroprojection</b> .....	R 622 - 2
1.1 Principe de la projection frontale .....	— 2
1.2 Spécificité de la rétroprojection .....	— 3
1.3 Moteur optique : élément commun .....	— 5
<b>2. Tubes cathodiques</b> .....	— 5
2.1 Principe de la rétroprojection à tubes.....	— 6
2.2 Superposition des trois couleurs .....	— 6
2.3 Tube de projection.....	— 6
2.4 Colorimétrie .....	— 7
2.5 Applications .....	— 8
<b>3. Cristaux liquides</b> .....	— 9
3.1 Projecteurs à valves transmissives.....	— 9
3.2 Projecteurs à valves réflectives .....	— 16
3.3 Spécificités de la rétroprojection LCD .....	— 19
3.4 Applications .....	— 19
<b>4. Éléments micromécaniques</b> .....	— 19
4.1 DMD .....	— 19
4.2 GLV : <i>grating light valve</i> .....	— 20
4.3 Applications .....	— 21
<b>5. Notion de rendement lumineux</b> .....	— 21
5.1 Système d'éclairage ou de collection.....	— 21
5.2 Module de gestion des couleurs.....	— 21
5.3 Modulation électro-optique .....	— 22
5.4 Formation d'image et cabinet de rétroprojection .....	— 22
5.5 Conclusion .....	— 22
<b>6. Autres techniques de projection</b> .....	— 22
6.1 Projecteurs ILA.....	— 22
6.2 Projecteurs laser .....	— 22
6.3 Talaria et Eldophore .....	— 23
<b>7. Conclusion</b> .....	— 23
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. R 622

**L**es systèmes de projection d'image existent maintenant depuis plusieurs siècles et les principes de base n'ont pas fondamentalement évolué (figure A). Il s'est toujours agi d'illuminer une image de faible dimension à l'aide d'une source lumineuse et de procéder à son agrandissement à l'aide d'éléments optiques adéquats.

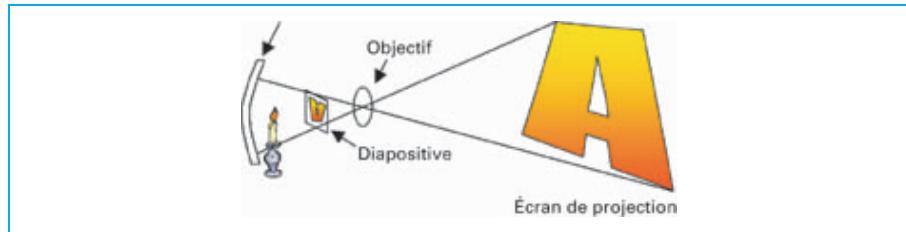


Figure A – Principe de la projection d'image

*En revanche, les technologies des composants clés qui constituent l'ossature du projecteur se sont, elles, beaucoup améliorées. Les lampes à décharge ont remplacé les lampes à pétrole, et aux gravures des siècles passés ont été substituées successivement les diapositives photographiques, le film de cinéma et dernièrement les valves électroniques.*

*La seule exception à cette règle est intervenue lors du développement des projecteurs utilisant des tubes à rayons cathodiques où, dans ce cas particulier, un même composant délivre à la fois l'information à visualiser et l'énergie lumineuse nécessaire à sa visualisation.*

Le présent dossier se propose de décrire les différentes technologies impliquées dans le monde de la **projection électronique d'images animées**. Les avantages et les inconvénients de chacune des solutions seront discutés en regard des deux applications possibles que sont la **projection frontale** et la **rétroprojection**.

## 1. Projection et rétroprojection

### 1.1 Principe de la projection frontale

Dans un système de projection frontale, l'utilisateur est situé du même côté de l'écran que l'appareil de projection d'image. L'écran est donc éclairé par l'avant (figure 1).

L'inconvénient principal de la projection frontale réside dans son aptitude à diffuser la lumière ambiante. Afin d'obtenir une bonne luminosité de l'image projetée, il est nécessaire d'utiliser un écran blanc très réfléchissant. Malheureusement, cela a pour effet d'augmenter le taux de réflexion de la lumière ambiante et par conséquent d'élèver la valeur minimale de la luminance qui peut être atteinte (niveau noir). Cela diminue le contraste  $C$ :

$$C = L_{\max}/L_{\min} \quad (1)$$

avec  $C$  le contraste,

$L_{\max}$  la luminance maximale de l'image ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ),

$L_{\min}$  la luminance minimale de l'image ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

C'est la raison pour laquelle tous les dispositifs de projection frontale actuels nécessitent de réduire notamment (salle de réunion), voire totalement (salle de cinéma), la lumière ambiante afin de profiter d'un confort de visualisation optimal.

#### 1.1.1 Paramètres photométriques

Reprendons deux des principales grandeurs photométriques.

■ **Flux lumineux** : s'exprime en lumens (lm) ; une source monochromatique de 1 W, de 555 nm de longueur d'onde, émet un flux de 683 lm. Le lumen est le flux émis par une source ponctuelle d'une unité d'angle solide dont l'intensité lumineuse est une candela (1 cd).

■ **Luminance** : intensité par unité de surface projetée orthogonalement sur un plan normal à la direction considérée. L'unité est la candela par mètre carré ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) ou le nit (nt) ou  $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ .

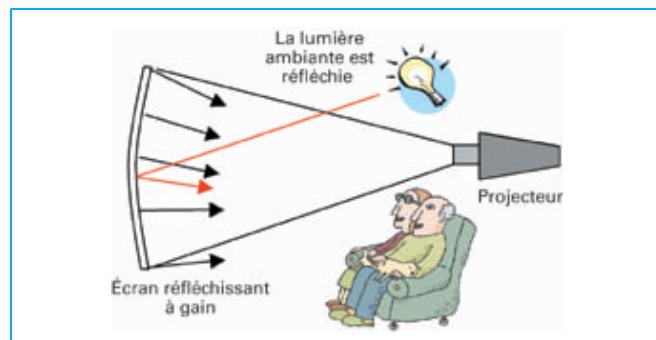


Figure 1 – Projection frontale

## 1.1.2 Loi fondamentale de la projection

Dans le cadre de la projection (mais aussi de la rétroprojection), le flux lumineux  $\Phi$  produit par une source de type projecteur est lié à la luminance disponible sur l'écran par la relation :

$$L = \frac{\Phi \cdot G}{\pi \cdot S} \quad (2)$$

avec  $\Phi$  le flux lumineux (lm),  
 $G$  le gain de l'écran,  
 $S$  la surface de l'écran ( $m^2$ ).

En conséquence, pour un flux lumineux donné, plus la surface de projection augmente, plus la brillance de l'image diminue et plus la luminosité ambiante doit être atténuée.

Il faut cependant souligner qu'il est possible d'augmenter la luminosité réfléchie en augmentant le gain de l'écran. Cela peut être par exemple réalisé en imprimant une courbure à l'écran de projection (figure 1). Cet artifice a malgré tout ses limites car augmenter le gain de l'écran se traduit inévitablement par une diminution de l'angle de visualisation. Ainsi, dans une salle de cinéma, le gain de l'écran n'excède pas 1,3 de manière à ne pas pénaliser les spectateurs situés sur les bords de la salle.

## 1.2 Spécificité de la rétroprojection

Dans un système de rétroprojection, l'utilisateur est séparé de l'appareil de projection d'image par l'écran de visualisation, celui-ci étant éclairé par l'arrière (figure 2).

Les principaux composants d'un rétroprojecteur sont (figure 3) :

- le **moteur optique**. C'est l'organe central qui fournit l'information à visualiser sous forme lumineuse. Il existe différentes technologies de moteurs optiques (tubes, cristaux liquides, micromiroirs...) (§ 1.3) ;
- un **écran de rétroprojection**. Grâce à sa structure caractéristique, il permet de diriger l'information lumineuse dans un cône particulier correspondant à l'emplacement des spectateurs. De plus, il améliore le contraste en piégeant la lumière ambiante (figure 2) ;
- un ou deux **miroirs**. Le miroir permet de plier le chemin optique et par conséquent de concevoir des appareils ayant une profondeur acceptable (50 cm pour 1,20 m de diagonale) ;
- un **châssis de télévision**. Il assure l'interface entre le monde électronique des signaux de télévision et le monde optique de la visualisation. La partie amont du châssis sélectionne les différentes sources d'images disponibles (antenne, câble, satellite, lecteur DVD, magnétoscope...) et les amplifie. La partie aval formate ces signaux et les adapte aux contraintes de la technologie de moteur optique utilisée.

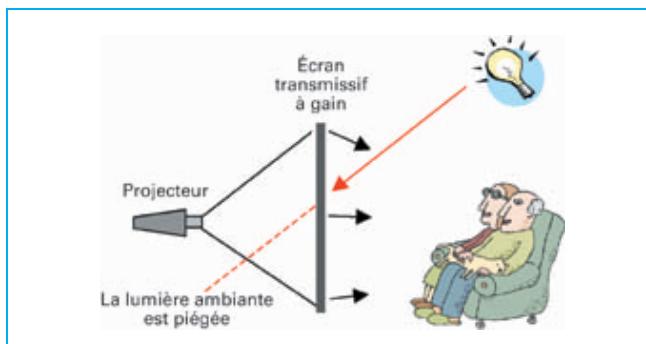


Figure 2 – Rétroprojection

## 1.2.1 Écran de rétroprojection

Outre le moteur optique, le composant clé qui assure la qualité d'image d'un rétroprojecteur est l'écran.

Les rétroprojecteurs de télévision disposent en général d'un écran de type Fresnel (figure 4) qui permet d'obtenir une meilleure uniformité de l'image et de focaliser l'énergie lumineuse en direction du spectateur (gain directionnel en luminance). Les gains obtenus peuvent aller de 3 à 7 suivant les applications et peuvent conduire à des luminosités très importantes (2 000 cd · m<sup>-2</sup> en pic).

Contrairement à la technique de projection frontale, il est possible de concevoir des écrans de rétroprojection qui absorbent une partie importante de l'éclairage ambiant. Pour ce faire, à l'écran de Fresnel est accolé un écran lenticulaire constitué de minilentilles cylindriques verticales et d'un réseau de bandes verticales noires absorbantes.

Les lentilles ont pour rôle :

- de focaliser la lumière entre les bandes noires de manière à assurer une bonne transmission lumineuse ;
- d'augmenter l'angle de visualisation en étalant la lumière dans le sens horizontal.

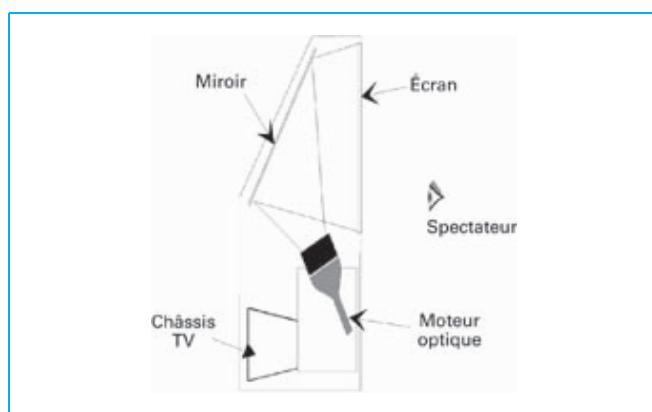


Figure 3 – Principe de la rétroprojection

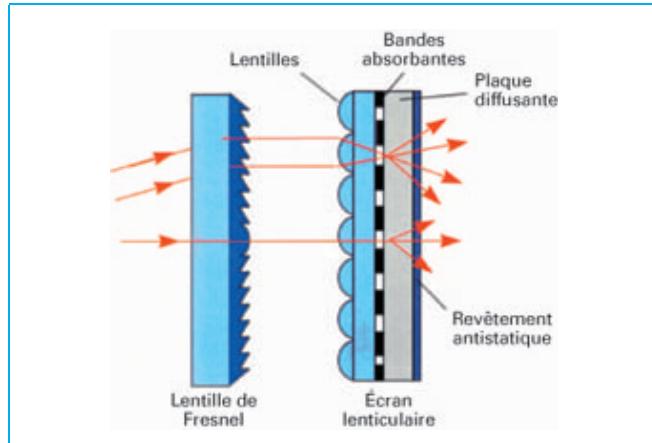


Figure 4 – Écran plan-convexe pour rétroprojecteur LCD/DMD

Les bandes noires ont pour rôle :

- d'absorber la lumière ambiante, afin d'obtenir un très bon contraste de l'image même sous forte ambiance lumineuse ;
- de donner un aspect sombre à l'écran, qui est plus en adéquation avec ce qu'attend le téléspectateur en terme de *design* de téléviseur.

La plaque diffusante a pour rôle d'étaler légèrement l'angle de vue dans le sens vertical.

## 1.2.2 Deux types d'écrans

Il est à noter qu'il existe deux types d'écrans de rétroprojection suivant la technologie de moteur optique employée :

- écran pour rétroprojecteur mono-objectif (LCD : *liquid crystal display*, LCOS : *liquid crystal on silicon*, DMD : *digital micromirror device*) ;
- écran pour rétroprojecteur tri-objectif (CRT : *cathode ray tube*).

Le premier est illustré sur la figure 4. Il est utilisé dans les rétroprojecteurs à cristaux liquides (LCD, LCOS) ou à micromiroirs (DMD) qui n'utilisent qu'un seul objectif de projection. Il est de conception assez simple et permet d'atteindre plus facilement des pas lenticulaires fins (155 µm Toppan), et par conséquent d'afficher la télévision haute définition à moindre coût.

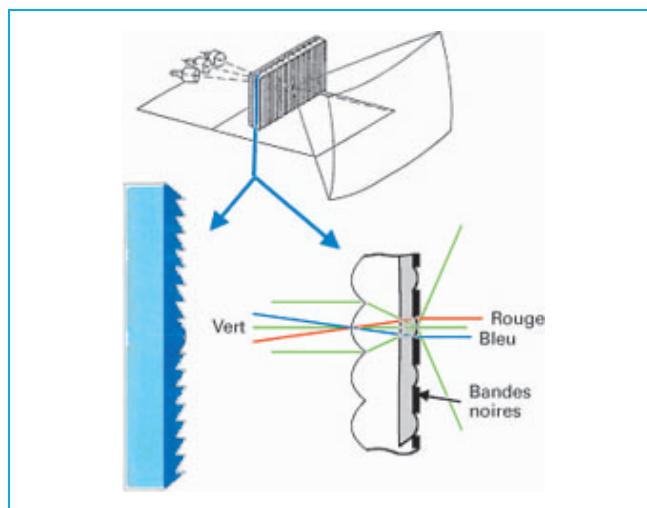


Figure 5 – Écran biconvexe pour rétroprojecteur CRT

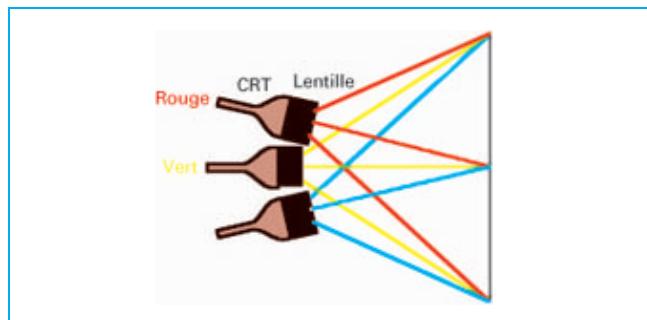


Figure 6 – Rétroprojecteur CRT

Le second, qui est illustré sur la figure 5, est le plus ancien puisqu'il est utilisé sur tous les rétroprojecteurs à tube. En effet, comme nous le verrons au paragraphe 2, un rétroprojecteur à tubes requiert la présence de trois sources lumineuses (rouge, verte, bleue) qui se superposent sur l'écran (figure 6).

De ce fait, il est nécessaire d'introduire un réseau de lentilles supplémentaire dans l'écran lenticulaire (réseau biconvexe). L'objectif est de renvoyer dans la même direction les faisceaux rouge, vert et bleu qui initialement arrivaient sur l'écran avec des angles d'incidence différents, fonction de la position relative des trois tubes cathodiques. Ce phénomène est appelé décalage de couleur (*color shift*). S'il est mal compensé, l'utilisateur observera des images bleuâtres, verdâtres ou rougeâtres suivant l'angle sous lequel l'image est visualisée.

Compte tenu de la structure plus complexe de ce type d'écran et de la difficulté à correctement superposer les deux réseaux de lentilles, les pas en vigueur sont plus larges (0,5 à 1 mm) et il est donc plus difficile d'atteindre de hautes résolutions que dans le cas de l'écran pour rétroprojecteur mono-objectif.

## 1.2.3 Fabrication des écrans

Il existe deux techniques de fabrication d'écrans de rétroprojection.

■ **Écran simple** : les fonctions lenticulaires et Fresnel sont fabriquées sur les deux faces d'une même feuille de plastique (acrylique). Ce procédé de fabrication ne peut pas être utilisé pour la technologie CRT qui nécessite un lenticulaire biconvexe (figure 5).

■ **Écran double** : chaque fonction est fabriquée sur deux feuilles de plastique séparées qui sont ensuite assemblées. Cela conduit à une plus grande flexibilité au niveau du *design* optique de l'écran. Cette technique a pour principal avantage d'offrir la possibilité d'orienter la structure Fresnel vers l'intérieur de l'écran, et donc de limiter les pertes optiques à l'entrée (figure 7). Elle peut être utilisée pour les deux types de rétroprojecteurs (mono-objectif, tri-objectif).

La génération des bandes absorbantes est réalisée avec plus de facilité dans le cas des **écrans biconvexes** car les technologies d'impression (*printing*) qu'elle utilise sont très répandues.

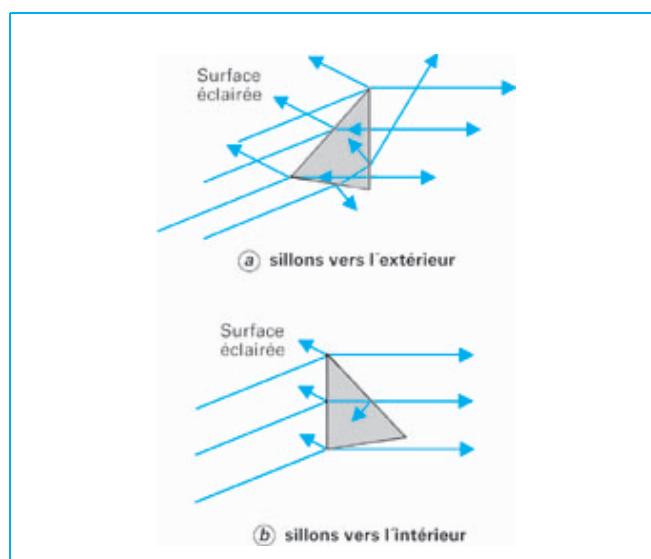


Figure 7 – Pertes par réflexion dans un Fresnel

Dans le cas d'**écrans lenticulaires plans convexes**, il est nécessaire de faire appel à des techniques de photolithographie pour déposer les bandes absorbantes.

#### 1.2.4 Défauts typiques liés à un écran de rétroprojection

L'écran de rétroprojection doit être conçu avec précaution. Plusieurs types de défauts peuvent apparaître :

- **non-uniformité de luminosité** ;
- **moiré**. Il s'agit de fréquences de battement entre la fréquence spatiale du Fresnel et celle du lenticulaire, qui peuvent de plus se combiner avec un battement supplémentaire dû à la fréquence spatiale de la valve optique, dans le cas de composants constitués de pixels isolés (DMD, LCD) ;
- **pertes par réflexion**. Elles sont causées principalement par l'écran de Fresnel, qui, selon que les sillons sont orientés vers la source lumineuse ou vers le spectateur, offrira respectivement plus ou moins de pertes lumineuses (figure 7) ;
- **double image ou effet « arc-en-ciel »**. Il s'agit de réflexions parasites à l'intérieur de l'écran de Fresnel qui créent une image secondaire irisée, que le spectateur peut apercevoir lorsqu'il se place sous une incidence élevée ( $20^\circ$ ) (figure 8).

#### 1.2.5 Miroirs

Il existe deux architectures de repliement de faisceaux dans les rétroprojecteurs.

**Structure à un seul miroir** : cette structure est la plus ancienne. Elle est utilisée dans les rétroprojecteurs à tubes. Le miroir est un film tendu en Mylar qui a la particularité d'être léger et très réfléchissant (96 %). Cependant, compte tenu de sa biréfringence intrinsèque, il ne peut pas être utilisé avec des moteurs optiques générant des faisceaux de lumière polarisée (LCD, LCOS). Cela provoquerait des non-uniformités de couleur inacceptables.

Le fait d'utiliser un seul miroir permet d'avoir une profondeur relativement réduite (50 cm pour 1,25 m de diagonale) mais nécessite de poser le téléviseur sur le sol (figure 3).

**Structure à deux miroirs** : cette structure est apparue avec les rétroprojecteurs à base de moteurs optiques compacts (LCD, LCOS, DLP : *digital light processing*). Elle donne la possibilité de concevoir des téléviseurs que l'on peut disposer sur une table (figure 9).

Si la lumière générée est polarisée, le miroir secondaire n'est plus en Mylar. Une couche d'aluminium est disposée sur une plaque de verre et assure la réflexion de l'image. La plupart du temps, des couches optiques supplémentaires sont ajoutées pour atteindre des réflectivités supérieures, de l'ordre de 96 %.

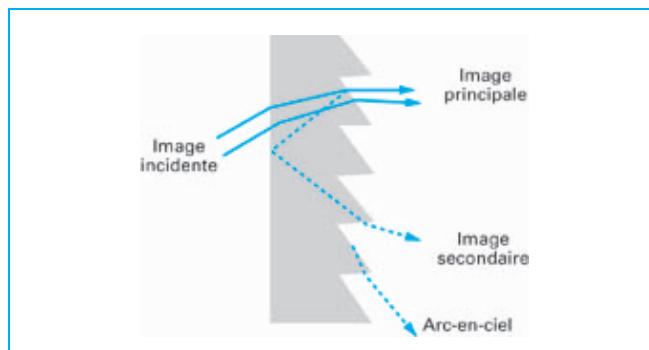


Figure 8 – Double image et effet « arc-en-ciel »

#### 1.3 Moteur optique : élément commun

Diverses solutions techniques cohabitent afin d'assurer la fonction de moteur optique, cet organe central et essentiel qui assure la modulation de la lumière. Dans chacune des technologies décrites ci-après, nous analyserons leurs avantages et leurs inconvénients, nous verrons également si leurs caractéristiques propres les rendent plus adaptées à la projection ou à la rétroprojection.

### 2. Tubes cathodiques

Les premiers systèmes électroniques de projection d'image qui sont apparus dans les années 1970 ont utilisé la technologie des tubes à rayons cathodiques (CRT). Leur utilisation s'est accrue dans les années 1980 avec l'apparition de la rétroprojection grand public. De nos jours, compte tenu de leur encombrement, de leur masse et de la difficulté de mise en place et de réglage chez le client, il n'existe quasiment plus de produits à base de tube dans le monde de la projection frontale, sauf dans des applications très spécifiques (militaires...). Ceux-ci ont été supplplantés par les technologies plus compactes et plus conviviales que sont les projecteurs à cristaux liquides (LCD) (§ 3) ou à micromiroirs (DLP) (§ 4).

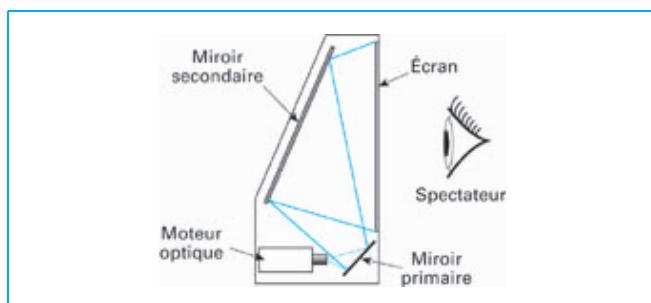


Figure 9 – Structure à deux miroirs

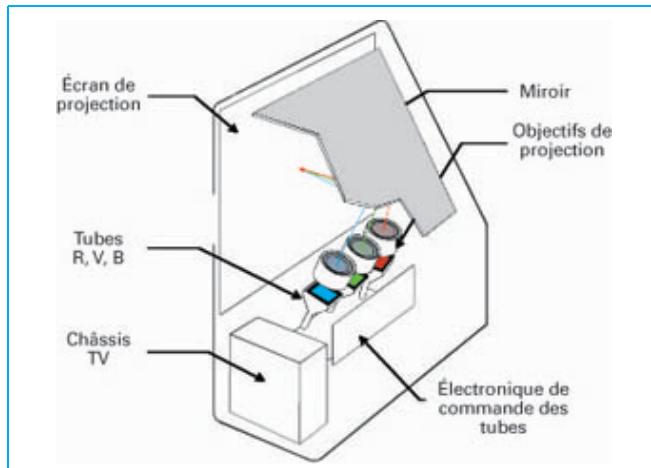


Figure 10 – Rétroprojecteur à tubes

De la même façon, mais un peu plus tard, le monde de la rétroprojection, qui était largement dominé par les tubes jusqu'au début des années 2000, a migré à partir de 2002 vers ces mêmes technologies LCD et DLP, auxquelles s'est ajoutée la technologie LCOS qui apportait des avantages spécifiques, notamment en terme de résolution (§ 3.2). Cette évolution a pu se mettre en place en vertu de la diminution des coûts des composants clés engendrée par la croissance des marchés de projection frontale. En conséquence, la grande majorité des rétroprojecteurs disponibles aujourd'hui à la vente est à base de *microdisplays*.

Dans le paragraphe suivant, nous allons uniquement détailler le principe de fonctionnement du rétroprojecteur CRT, compte tenu du fait qu'il est techniquement plus contraignant à réaliser qu'un projecteur frontal.

## 2.1 Principe de la rétroprojection à tubes

La figure 10 expose le schéma de base de ce type de technologie.

Trois tubes à rayons cathodiques – rouge, vert et bleu – sont placés de telle sorte que les trois images résultantes se superposent sur l'écran.

## 2.2 Superposition des trois couleurs

Compte tenu du fait que les trois sources d'images ne peuvent être physiquement superposées, des déformations trapézoïdales apparaissent sur l'image (figure 11).

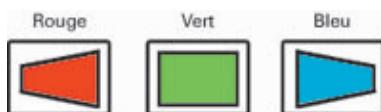
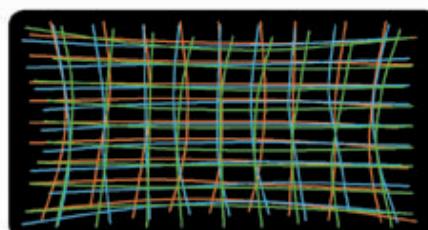
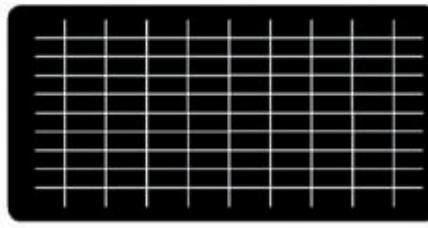


Figure 11 – Déformations trapézoïdales



(a) image avant correction



(b) image après correction

Figure 12 – Distorsions géométriques

De plus, des distorsions supplémentaires de types « coussin » ou « tonneau », provenant du système de balayage, et que l'on retrouve également dans les téléviseurs à vision directe utilisant des tubes, se superposent aux déformations précédentes. Si bien qu'un système électronique de correction de géométrie et de convergence s'avère nécessaire pour obtenir une image rectangulaire dont les trois composantes primaires (R, V, B) sont parfaitement alignées (figure 12).

Après avoir mesuré en usine le taux de distorsion de l'appareil, le module électronique de correction applique les formes d'ondes adéquates sur les bobines de déviation horizontale et verticale de chacun des tubes de manière à superposer les trois images.

## 2.3 Tube de projection

Il est constitué de quatre éléments principaux (figure 13) :

- l'enveloppe de verre et le canon à électrons ;
- le système de focalisation du faisceau électronique ;
- la déflexion du faisceau ;
- la couche de « phosphores ».

**Note :** par abus de langage, les termes « phosphores rouge, vert ou bleu » sont largement utilisés pour désigner ces couches phosphorescentes. Cette couche de phosphores repose sur une dalle de verre.

### 2.3.1 Concentration du faisceau

Un élément important de la qualité d'un tube est son aptitude à reproduire des détails fins. Pour y parvenir, un jeu de lentilles électrostatiques est placé sur le chemin du faisceau électronique de manière à le concentrer sur la couche de phosphores (figure 14). De plus, une électrode supplémentaire assure une focalisation dynamique en homogénéisant la taille du spot sur toute la surface de l'écran par l'application d'une tension sur l'électrode G4 qui varie de manière parabolique en fonction de la position du faisceau sur l'écran (figure 15). Ce type de technique est principalement utilisé dans les applications grand public.

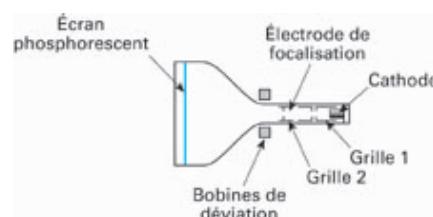


Figure 13 – Tube de projection

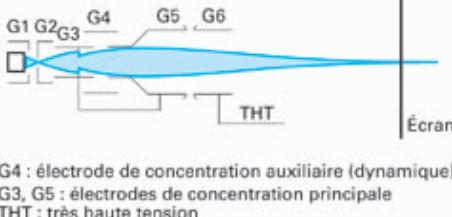


Figure 14 – Concentration du faisceau

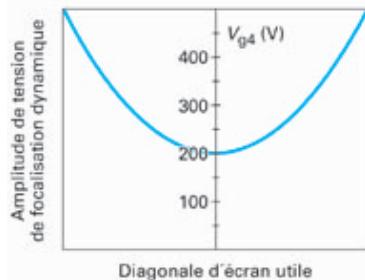


Figure 15 – Tension de focalisation dynamique en fonction de la position du spot

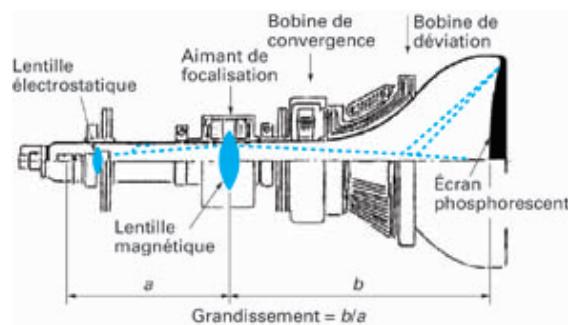


Figure 16 – Tension de focalisation dynamique en fonction de la position du spot

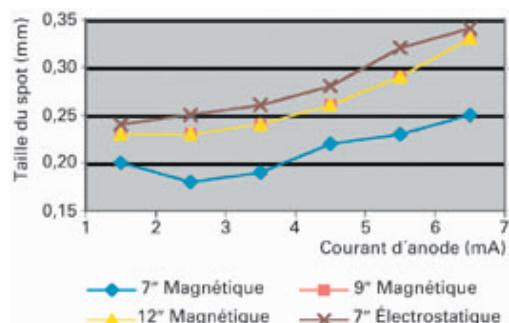


Figure 17 – Évolution de la taille du spot

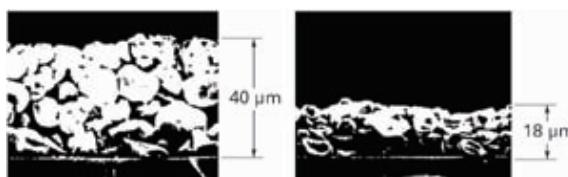


Figure 18 – Phosphores vus au microscope

Pour obtenir une taille de spot encore plus fine, dans le cadre d'applications de télévision haute définition par exemple, on adjoint au système précédent une lentille magnétique montée à l'extérieur du tube (figure 16). Cette lentille étant plus grande, les aberrations sont diminuées. Bien entendu, ce type de solution évoluée engendre un surcoût qui oblige à ne l'utiliser que pour des produits haut de gamme ou professionnels.

Pour résumer, la finesse du spot électronique dépend :

- du courant de faisceau ;
- du type de focalisation ;
- de la taille des lentilles électroniques ;
- de la taille du col du tube ;
- de la densité des phosphores.

Ainsi, la taille du spot augmente avec le courant de faisceau (ou courant d'anode) et avec la taille du tube (figure 17). Seulement, plus la taille du tube augmente et plus le facteur de grandissement de la lentille de projection diminue à dimension d'image projetée constante. Ainsi, on s'aperçoit que pour obtenir une bonne image de TVHD (télévision haute définition), il est nécessaire de passer à des tailles de tube de 9 pouces alors que 7 pouces suffisent pour les standards de télévision classiques.

Il est également à noter que la diffusion à l'intérieur du phosphore dégrade la qualité du spot lumineux. En effet, la variation du diamètre du spot varie linéairement avec l'épaisseur du phosphore. Pour diminuer la taille du spot, il faut donc augmenter la densité de phosphore afin de minimiser la diffusion et garder la même efficacité lumineuse (figure 18).

### 2.3.2 Courbure de champ et efficacité lumineuse

De manière générale, dans un système de projection, la surface pour laquelle l'image est focalisée correctement se trouve sur une portion de sphère. C'est une des raisons pour lesquelles, dans un tube de projection, la surface supportant les phosphores émissifs est incurvée. Ainsi, l'image résultante est nette en tout point (figure 19).

La seconde raison, mais qui n'est pas la moindre, est que cette courbure entraîne une meilleure efficacité de collecte de la lumière. La figure 20 présente la complexité des organes de couplage entre la couche phosphorescente et l'objectif de projection dans le cas d'un tube de US Precision Lens. La forme incurvée de la dalle de verre sur laquelle repose la couche phosphorescente permet, grâce à la présence d'un liquide dont l'indice de réfraction est égal à celui du verre, de collecter au mieux la lumière émise et d'éviter au maximum les réflexions parasites, ce qui améliore le contraste. Ce couplage est donc pour ainsi dire la première lentille de l'objectif. Le liquide qui assure ce couplage est souvent dénommé « liquide d'indice ».

Compte tenu des températures élevées générées par le fort courant de faisceau (plusieurs milliampères), le liquide d'indice associé à des ailettes métalliques participe de plus à la dissipation de l'énergie thermique et donc au refroidissement du système.

## 2.4 Colorimétrie

Le spectre d'émission d'un tube de projection CRT est celui du phosphore utilisé pour chaque couleur (figure 21). Ces spectres sont très chromatiques (sauf pour le bleu), ce qui facilite la conception du système de projection et réduit son coût. Le rendu colorimétrique d'un projecteur CRT est donc uniquement fonction de la performance des phosphores des tubes.

Les coordonnées colorimétriques ainsi obtenues sont représentées sur un diagramme CIE 1931, où le bord dit de « l'espace des couleurs » est formé par les couleurs monochromatiques (figure 22). La restitution des couleurs se fait à l'intérieur d'un

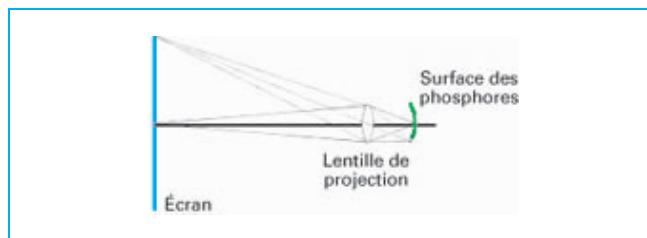


Figure 19 – Courbure de champ

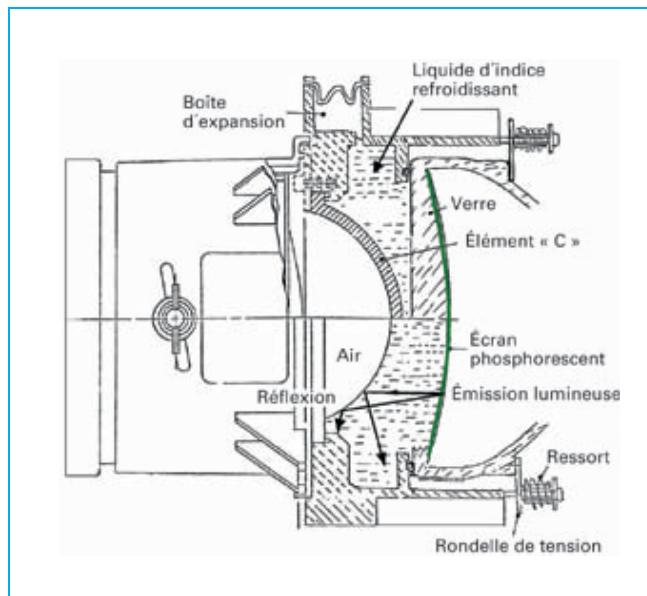


Figure 20 – Organes de couplage entre l'écran et l'objectif (Delta 81 US Precision Lens)

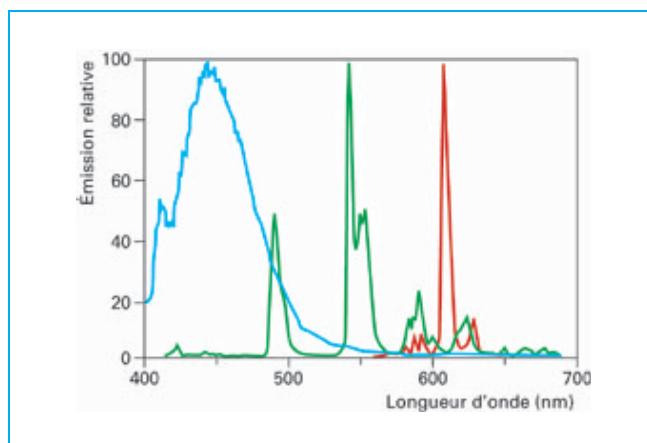


Figure 21 – Spectre des phosphores pour un tube

triangle formé des trois droites reliant les trois couleurs primaires. Le système ne peut donc restituer que les couleurs qui se trouvent à l'intérieur de ce triangle.

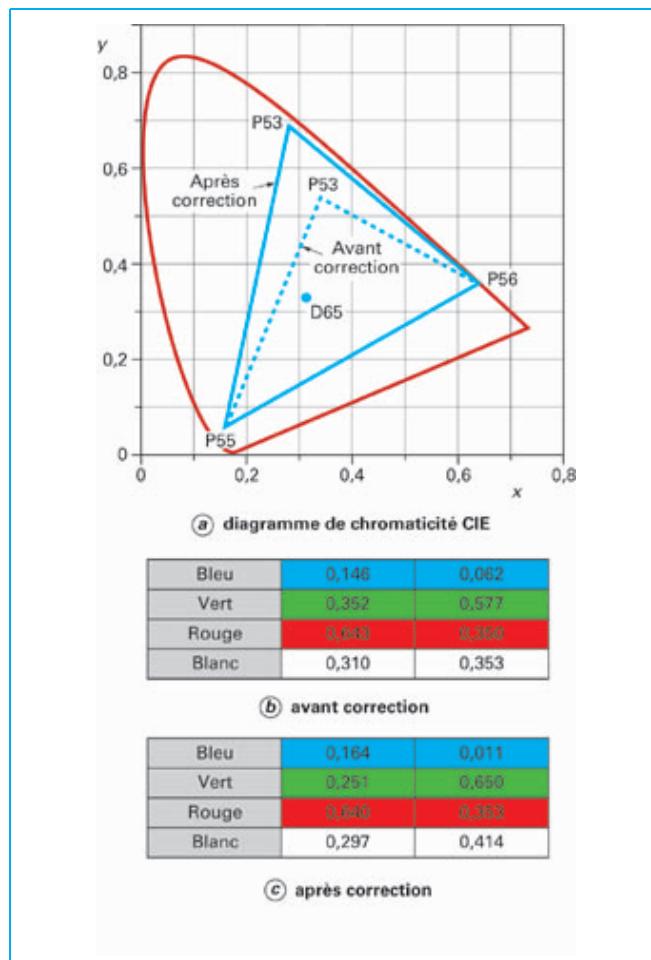


Figure 22 – Coordonnées colorimétriques d'un tube avant et après correction par des filtres dichroïques

La figure 22 présente un exemple de coordonnées colorimétriques d'un tube placées sur le diagramme CIE 1931. On y voit aussi que l'ajout de filtres dichroïques améliore sensiblement la saturation des couleurs en élargissant le triangle.

## 2.5 Applications

Comme indiqué précédemment, les tubes de projection ont connu leur heure de gloire jusqu'en 2002, date à laquelle ils ont été, année après année, rapidement supplantis par les technologies à base de *microdisplays*, notamment DLP qui détiennent aujourd'hui la plus grosse part du marché, suivis par les rétroprojecteurs LCOS. On trouve néanmoins des technologies de projection à base de tubes dans des applications très spécifiques, professionnelles ou militaires, telles que les simulateurs de vol. Ceux-ci demandent des contraintes particulières comme celle consistant à projeter une image sur un dôme. La flexibilité qu'offre sur un tube le balayage et le focus électriques permet de corriger très facilement les distorsions de format d'image inhérentes à la projection sur une surface non plane.

### 3. Cristaux liquides

Il existe deux types de projecteurs utilisant des valves à cristaux liquides :

- les projecteurs à valves transmissives, ou projecteurs LCD (§ 3.1) ;
- les projecteurs à valves réflectives, ou projecteurs LCOS (§ 3.2).

Les premiers sont apparus au début des années 1990 et sont maintenant très répandus dans le monde de la projection frontale professionnelle. Ils sont utilisés pour des applications graphiques et vidéo dans des salles de réunion et de conférence. Ils sont déclinés en une large variété de modèles, de l'ultraportable (2 kg) au très lumineux (5 000 lm). Leur architecture est maintenant devenue un standard.

Les projecteurs LCOS (*liquid crystal on silicon*) quant à eux sont issus d'une technologie plus récente qui n'est pas encore très implantée sur le marché. Ils disposent d'avantages très intéressants en terme de haute résolution et de coût, ce qui les rend très attractifs pour des solutions de rétroprojecteurs de TVHD à des prix compétitifs. Compte tenu de la jeunesse de cette activité, il n'y a pas véritablement de standard pour les moteurs optiques et de nombreuses solutions techniques sont envisagées par les constructeurs.

#### 3.1 Projecteurs à valves transmissives

Les projecteurs LCD à valves transmissives sont constitués de manière générale (figure 23) :

- d'un **système d'illumination** (§ 3.1.1) ;
- d'un **système de gestion colorimétrique** (§ 3.1.2) ;
- de **trois valves LCD transmissives**, une pour chaque couleur primaire (§ 3.1.6) ;
- d'un **système de recombinaison de couleurs** (§ 3.1.7) ;
- d'un **objectif de projection** (§ 3.1.7).

**Nota :** le paragraphe 5 décrit de manière détaillée le bilan des pertes optiques introduites par chacun de ces composants.

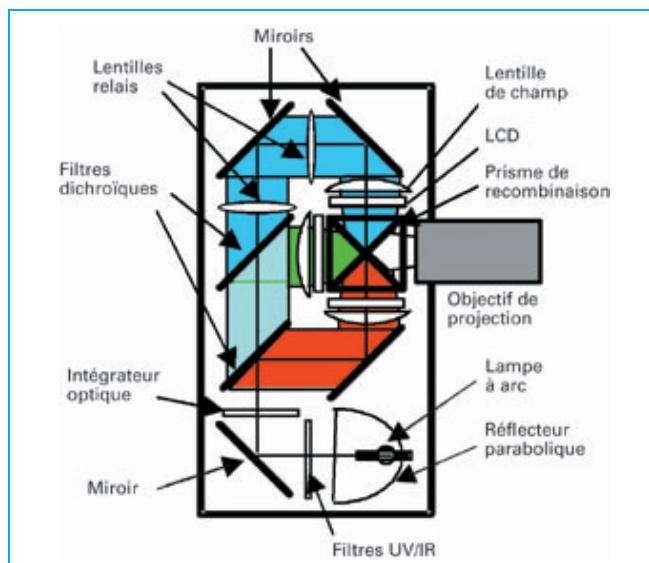


Figure 23 – Projecteur utilisant des valves à cristaux liquides (LCD)

#### 3.1.1 Système d'illumination

Il a pour rôle de délivrer un puissant faisceau lumineux dans un format rectangulaire. Il est lui aussi plus ou moins standardisé. Le plus souvent, il est réalisé à l'aide des éléments suivants :

- une **lampe de type UHP** (ultrahaute pression) à arc court (1 à 1,3 mm) dont la puissance peut varier suivant les applications entre 100 W et 270 W. Le spectre de cette lampe est continu et optimisé de manière à ce que la gestion colorimétrique soit facilitée (figure 24) ;
- un **réflecteur parabolique** qui a pour rôle de collecter un maximum de lumière ;
- un **filtre UV/IR** afin d'éliminer les composantes du spectre de la lampe qui pourraient dégrader les performances du LCD (UV) et augmenter sa température (IR) ;
- un **intégrateur optique** dont la fonction consiste à homogénéiser et à transformer un éclairage de section circulaire en un éclairage de section rectangulaire (4/3, 5/4 ou 16/9 suivant les applications) (§ 3.1.4).

**Nota :** la présence de lentilles relais dans la voie bleue (figure 23) permet de compenser la différence de chemin optique entre la voie bleue (plus longue) et les voies rouge et verte.

#### 3.1.2 Système de gestion colorimétrique

Par ce terme, nous entendons tout d'abord l'opération de séparation du spectre de la source lumineuse (figure 24) en trois faisceaux – rouge, vert et bleu – qui seront modulés par chacune des valves électro-optiques. Cette séparation nécessite un filtrage particulier afin d'obtenir les coordonnées colorimétriques adéquates pour la restitution des couleurs. Cette gestion est faite d'ailleurs aussi à la prise de vue dans la caméra vidéo lorsque la scène est séparée en trois images représentant les couleurs primaires avec des bandes spectrales bien définies pour le rouge, le vert et le bleu.

Sur la figure 23, la gestion colorimétrique est réalisée à l'aide de deux filtres dichroïques qui ont la particularité de réfléchir certaines longueurs d'onde et de transmettre les autres. Le premier filtre réfléchit le rouge et transmet le vert et le bleu. Le deuxième filtre réfléchit le vert et transmet le bleu.

Dans le projecteur, à l'opération de restitution des couleurs primaires, s'ajoute une opération d'équilibrage des intensités lumineuses des faisceaux rouge, vert et bleu afin d'obtenir un niveau de blanc conforme aux attentes des clients (de 6 500 K à 10 000 K suivant les applications et les pays). Cette température de couleur est d'autant plus forte que le blanc est à dominante bleue. La lumière du Soleil a, par exemple, une température de couleur qui est d'environ 6 500 K. Elle correspond à la couleur que délivre un corps noir idéal lorsqu'il est chauffé à cette température. La courbe du corps noir est représentée sur la figure 25.

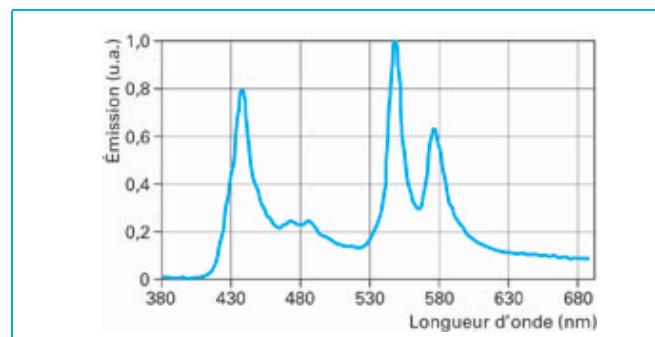


Figure 24 – Spectre d'une lampe UHP au mercure

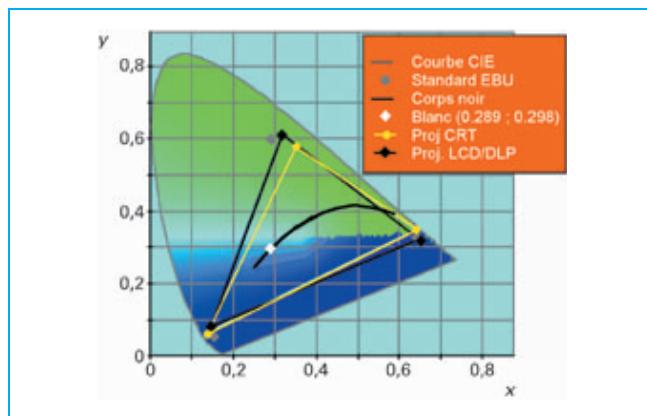


Figure 25 – Coordonnées colorimétriques d'un projecteur LCD comparées à celles d'un tube

Dans certains cas, il est souhaitable d'affiner l'équilibrage des couleurs à l'aide de l'électronique. Certaines fonctionnalités permettent même à l'utilisateur de choisir, via la télécommande, entre plusieurs températures de blanc prédefinies (« chaud », « normal », « froid »).

Au paragraphe 2.4, nous avons montré comment interpréter un diagramme CIE 1931 ; la figure 25 présente celui d'un projecteur LCD comparé à celui d'un projecteur à tubes. Le triangle des couleurs est plus étendu dans le cas des technologies (LCD, LCOS, DLP) pour lesquelles la gestion colorimétrique se fait indépendamment du composant qui génère l'image.

En effet, contrairement au cas du tube où la couleur et l'image sont générées sur un seul et même composant, les nouvelles technologies utilisant des filtres dichroïques sont beaucoup plus souples en terme de spécifications colorimétriques. Elles sont, de ce point de vue, plus adaptées aux images de télévision ou de cinéma pour lesquelles les standards exigent des triangles assez larges (voir standards EBU Tech. 3213, SMPTE 274M, ITU-R 709-3) afin d'obtenir une reproduction riche et fidèle des couleurs rencontrées dans la nature et acquise par la caméra. En revanche, pour des applications graphiques (salle de réunion), on pourra se contenter d'un triangle plus restreint, ce qui aura pour avantage de donner plus de marge pour accroître la luminosité de l'appareil, le spectre de la lampe étant moins sévèrement filtré.

### 3.1.3 Sources lumineuses disponibles

La lampe, source blanche étendue, est l'élément clé dans la gestion colorimétrique. Cette gestion induit des pertes s'élevant parfois à plus de 50 % du flux de la lampe. La distribution spectrale de la source lumineuse est un facteur important pour la gestion colorimétrique. Les principaux paramètres influençant le choix d'une source lumineuse sont :

- la durée de vie ;
- le flux ;
- la luminance ;
- la température de couleur.

Ce sont généralement des **lampes à arc sous pression** qui émettent de la lumière par décharge dans un gaz (figure 26).

La lampe est constituée d'un bulbe terminé par deux électrodes, espacées généralement de 1 à 3 mm (figure 27a). Le bulbe contient un mélange de matériau constitué soit par des halogénures métalliques, soit par du mercure ou par du xénon (selon le type de lampe), le tout fonctionnant sous haute pression (200 bar environ).

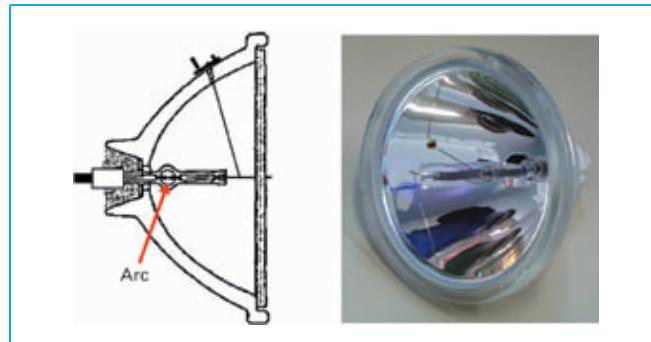


Figure 26 – Lampe UHP dans son réflecteur

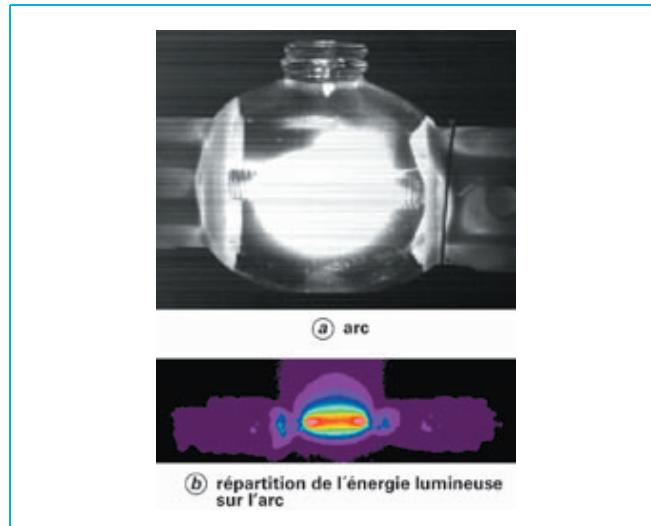


Figure 27 – Lampe UHP

Pour les applications nécessitant un grand flux lumineux, comme par exemple la projection de films dans une salle de cinéma, des **lampes au xénon** sont utilisées. Ces lampes ont un spectre proche de celui du Soleil et offrent des puissances électriques pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de watts. Elles ne sont pas envisageables pour des applications de projection électronique à cause de leur faible efficacité lumineuse, notamment aux faibles puissances (autour de  $25 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ).

Les lampes les mieux adaptées pour la projection et la rétroprojection d'images de télévision ou pour la projection d'images graphiques de type « présentation » sont les **lampes dites UHP**. Elles sont à base de **mercure**, dont le spectre est présenté sur la figure 24, et ont une efficacité supérieure à  $60 \text{ lm/W}$ . Elles ont été introduites par Philips Lighting au début des années 1990 et offrent des luminances aussi fortes que celle du Soleil (de l'ordre de quelques gigacandélas par mètre carré) (figure 27b). Un de leurs avantages majeurs est d'offrir au concepteur de systèmes d'illumination une très faible étendue géométrique de par son arc très court (< 1,3 mm) (voir encadré). Cela se traduit par une meilleure efficacité de collecteur et autorise de réduire les tailles des composants optiques et des valves, et donc de diminuer le coût du système.

Le spectre de ces lampes, qui ont une température de couleur très élevées ( $\sim 8\,500 \text{ K}$ ), est à dominante bleue et verte. Il affiche cependant un déficit dans le rouge. Ce phénomène limite leur efficacité

colorimétrique à environ 50 % pour les applications télévisuelles. Ce chiffre s'explique tout d'abord par le fait qu'il nous faut rejeter la raie du mercure qui se situe autour de 578 nm et qui représente une couleur jaune. En effet, cette raie se trouve à la limite entre les bandes spectrales verte et rouge et ne peut donc être utilisée sans provoquer une désaturation violente des couleurs primaires, notamment du rouge. Cette opération de filtrage passe-bande se traduit alors par une perte d'environ 30 % du flux. Le reste de la perte provient de la nécessité d'effectuer une balance des couleurs rigoureuse, nécessaire pour des applications de télévision, afin d'obtenir la température de blanc standard. Cette balance oblige à atténuer les bandes verte et bleue du spectre.

Les progrès observés ces dernières années dans la technologie des lampes sont le fruit d'investissements très importants consentis par les principaux fabricants que sont par ordre de maîtrise technologique, Philips Lighting au Pays-Bas, Osram en Allemagne et Phoenix au Japon. Ces travaux ont permis de réduire notablement la taille des arcs sous 1 mm, contribuant à une meilleure efficacité, ainsi qu'à l'augmentation de la durée de vie jusqu'à 10 000 heures pour une lampe de 100 W, 1 mm. Ces avancées ont accéléré la progression des rétroprojecteurs à *microdisplays* sur le marché grand public.

Cependant, il faut noter l'apparition de nouveaux composants de type diode électroluminescente de puissance, qui étaient utilisés jusqu'alors sur les feux de voiture ou aux carrefours des villes, et qui suscitent l'engouement des laboratoires de R&D quant à la possibilité

qu'ils remplacent un jour les lampes à arc. Les avantages seraient considérables en terme de durée de vie (50 000 heures). Il n'y aurait plus besoin de roue colorée dans les systèmes DLP, il suffirait pour cela d'utiliser trois diodes rouge, verte et bleue pilotées en séquence, l'allumage du téléviseur serait instantané et la gamme de reproduction des couleurs plus étendue. De plus, la consommation électrique pourrait être réduite de moitié. Quelques prototypes ont déjà été présentés mais ceux-ci ont un niveau de luminosité cinq fois inférieur au niveau de luminosité requis. Gageons que d'ici quelques années, les performances seront au rendez-vous.

### 3.1.4 Intégrateurs optiques

Comme indiqué dans la description générale du système d'éclairage, le but d'un intégrateur optique est double :

- homogénéiser l'éclairage provenant de la source ;
- transformer un éclairage circulaire en éclairage de section rectangulaire.

La figure 29 présente l'allure de l'éclairage en sortie du réflecteur parabolique.

L'intégrateur le plus communément rencontré dans le monde de la projection frontale LCD est constitué de deux réseaux de mini-lentilles (figure 30a).

#### Notion d'étendue géométrique

L'étendue géométrique  $G$  d'un faisceau lumineux éclairant une surface  $S$  à travers un diaphragme circulaire est d'une manière simplifiée le produit de cette surface par l'angle solide  $\Omega$  (figure 28) :

$$G = S \cdot \Omega \quad (3)$$

avec  $S$  la surface éclairée ( $m^2$ ),  
 $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \theta)$  l'angle solide en stéradians (sr),  
 $\theta$  le demi-angle qui sous-tend le faisceau sur la surface  $S$  (rad).

$G$  s'exprime alors en mètres carrés par stéradian.

##### Règles de base :

- le rapport, entre le flux lumineux reçu par la surface dans l'angle solide et l'étendue géométrique est la luminance du faisceau lumineux côté récepteur ;
- la luminance de la source dans un système optique ne peut en aucun cas augmenter ;
- l'étendue du faisceau issu de la source ne peut que se dégrader (augmenter). Étant donné que l'étendue est le produit entre une surface et un angle solide, si la surface augmente, l'angle solide diminue. Si la surface diminue, l'angle solide augmente.

Ce dernier concept est à la base de la photométrie. Il contribue à dimensionner des systèmes optiques et à calculer les flux que l'on peut y faire passer. Ce sont des concepts généraux qui s'appliquent sur des faisceaux homogènes. Pour concevoir un système optique avec précision, un calculateur optique est cependant nécessaire.

Dans le cas d'un système optique de projection, le concept d'étendue permet de donner des limites concernant, par exemple l'**adaptation des lampes aux dimensions des valves**. Le système optique peut alors être modélisé rapidement avec :

- d'un côté, l'étendue géométrique disponible  $E_{valve}$  pour porter l'image sur l'écran. C'est le produit de la surface de la valve par l'angle solide déterminé par l'ouverture numérique de l'objectif de projection ;

— de l'autre, l'étendue  $E_{éclairage}$  qui est le fruit de la collection et la mise en forme du faisceau provenant du système d'éclairage.

Si  $E_{valve} > E_{éclairage}$ , le système est surdimensionné.

Si  $E_{valve} = E_{éclairage}$ , le système est optimal. Le flux de la lampe est acheminé de façon efficace vers la sortie du projecteur.

Si  $E_{valve} < E_{éclairage}$ , ce qui est souvent le cas, alors le rendement du système est le rapport  $E_{valve}/E_{éclairage}$ . C'est un paramètre très important qui fixe, entre autres, le rapport coût/performance du système.

La valve est un composant dont le coût augmente rapidement avec la surface. Aussi, pour une optique de rétroprojection, par exemple, une très grande ouverture combinée avec un grand angulaire fait augmenter rapidement le prix. Un bon compromis consiste à utiliser une ouverture de l'ordre de  $F/2,8$ ,  $F$  étant la distance focale de l'objet. Au-delà, le prix devient excessif. Quant à la valve, les contraintes économiques liées au rendement de fabrication mènent à un diamètre généralement inférieur au pouce ( $< 25,4$  mm). Ce diamètre et l'ouverture de l'optique fixent alors l'étendue économique acceptable.

Il reste que les fabricants de lampes essaient de diminuer l'étendue de la source elle-même tout en augmentant sa luminance afin de rendre les systèmes de projection plus efficaces. Les lampes UHP à arc court progressent continuellement. Des prototypes existent avec des arcs de moins de 0,8 mm. Cependant, il semble qu'une limitation de la durée de vie de la lampe soit le prix à payer pour obtenir une diminution de la taille de l'arc. Ces avancées technologiques vont donc profiter en premier lieu aux projecteurs frontal pour lesquels ce paramètre est moins critique que pour les applications grand public.

Cela dit, la lampe n'est pas le seul obstacle à la diminution de l'étendue de la valve. Par exemple, pour des valves de TVHD (1 920 pixels  $\times$  1 080 pixels) de taille inférieure à 17 mm le pixel a une dimension de l'ordre de 7,7  $\mu\text{m}$ , ce qui amène des difficultés technologiques supplémentaires. En effet, les phénomènes de diffraction et d'interaction entre pixels diminuent la performance du système. De plus, l'objectif de projection doit résoudre des détails plus fins. Tous ces aspects cumulés entraînent des surcoûts non négligeables.

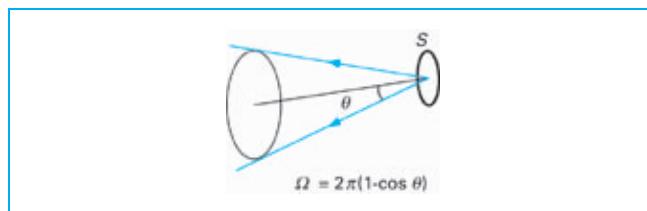


Figure 28 – Étendue géométrique

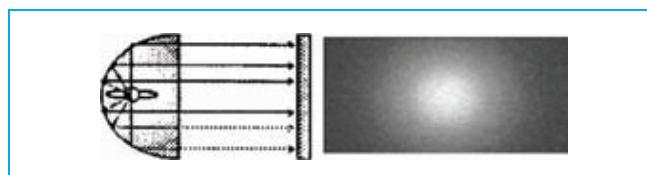


Figure 29 – Non-uniformité d'éclairage en sortie de réflecteur

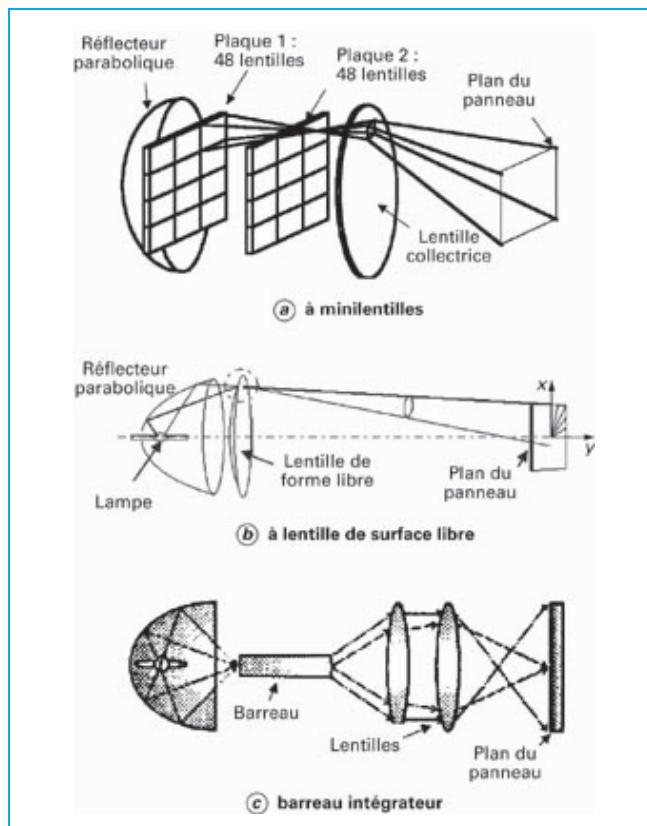


Figure 30 – Intégrateurs optiques

La première plaque intégrante comporte un **réseau de minilentilles** au format du LCD (4/3 ou 16/9). Chaque minilente est imaginée dans le plan du panneau LCD grâce au deuxième réseau et à la lentille collectrice, ce qui permet, en superposant ces images, à la fois d'uniformiser l'éclairage ( $> 70\%$ ) et de формater la section de l'éclairage à celui du LCD.

La seconde plaque intégrante, qui devient la nouvelle source de lumière, est imaginée dans la pupille de l'objectif.

L'efficacité d'un tel intégrateur est de l'ordre de 55 à 65 %.

L'intégrateur de la figure 30b est issu de la recherche (Thomson) et est constitué d'une **lentille dite libre** dont chaque point a été calculé par un logiciel de *design* et de simulation optique de manière à créer un éclairage rectangulaire dans le plan du LCD. Une deuxième lentille de ce type mais plus petite est nécessaire près du panneau afin de redresser et d'homogénéiser les angles d'incidence sur le LCD. Ce système est particulièrement adapté au projecteur LCD transmissif à un seul panneau (§ 3.1.7). L'efficacité obtenue est de 50 à 60 % et l'uniformité de 30 à 40 %.

L'intégrateur de la figure 30c nécessite un réflecteur elliptique (ou parabolique plus une lentille convergente). Il est centré autour d'un **barreau** le plus souvent creux, dont les parois intérieures sont réflechissantes. L'arc de la lampe est imaginé à l'entrée du barreau, qui, suite aux multiples réflexions à l'intérieur de celui-ci, produit à sa sortie une nouvelle source lumineuse uniforme et rectangulaire. Cette dernière est imaginée à son tour sur le panneau électro-optique *via* un objectif constitué de plusieurs lentilles. Ce système est surtout utilisé dans les projecteurs réflectifs à micromiroirs (DMD) ou à LCD réflectifs (LCOS).

### 3.1.5 Système de retour de polarisation

Comme nous le verrons au paragraphe 3.1.6, les valves à cristaux liquides ne peuvent fournir une caractéristique électro-optique utilisable que si elles sont éclairées par un faisceau polarisé. On trouve donc des films polariseurs à l'entrée de chacune des valves. Ces films ont la particularité de ne laisser passer qu'une composante de la lumière (par exemple verticale) et d'absorber (ou réfléchir) l'autre, ce qui réduit fortement l'efficacité lumineuse (§ 5).

Afin d'améliorer cette efficacité lumineuse, il existe des systèmes appelés « retour de polarisation » ou « convertisseur de polarisation » qui séparent la polarisation en ses deux composantes (verticale et horizontale), laissent passer la composante verticale, par exemple, et tournent l'autre composante de  $90^\circ$  de manière à la réinjecter dans l'éclairage. Des gains de l'ordre de 50 % de luminosité peuvent ainsi être obtenus. Cependant, ces systèmes se traduisent toujours par un doublement de l'étendue.

Plusieurs concepts de convertisseurs existent sur le marché, le plus répandu est combiné le plus souvent avec l'intégrateur optique du type de celui de la figure 30a mais on peut également le rencontrer dans des systèmes à barreau intégrateur (figure 30c).

Nous n'allons traiter ici que du premier cas car il est le plus couramment utilisé dans les projecteurs frontaux. Le schéma de principe est proposé sur la figure 31.

Un réseau de séparateur de polarisation (PBS : *polarization beam splitter*) est accolé à la deuxième plaque de l'intégrateur optique. Sur la section agrandie de la figure 31, on distingue le PBS qui laisse passer la polarisation de type P (parallèle au plan d'incidence) et réfléchit la polarisation de type S (orthogonale au plan d'incidence, *Senkrecht* en allemand). La composante S traverse alors une lame à retard demi-onde, ce qui a pour effet de tourner la composante S de  $90^\circ$  et par conséquent de la transformer en type P. Comme nous l'avons vu précédemment, cette conversion améliore le flux de sortie mais n'a pas une efficacité optimale (50 %) puisque, la surface de lumière ainsi obtenue étant doublée, l'étendue géométrique est également doublée et il sera d'autant plus difficile de l'injecter dans le couple valve + objectif (voir encadré Notion d'étendue géométrique).

### 3.1.6 Valves LCD

Nous allons maintenant détailler le principe de fonctionnement des valves LCD utilisées dans l'architecture de projecteur frontal de la figure 23. Tout d'abord, rappelons le principe de modulation électro-optique utilisé dans les cristaux liquides (figure 32).

La lumière incidente est filtrée à l'aide d'un polariseur. Sur une première plaque de verre est disposé un conducteur transparent, ou ITO (*indium tin oxide*). Une couche de polyimide servant à l'alignement des molécules de cristal liquide est implantée sur l'ITO et est frottée parallèlement à la direction de polarisation de la lumière incidente. La même opération est réalisée sur une deuxième plaque de verre à la différence que la couche d'alignement est frottée orthogonalement par rapport à la première couche. Lors de l'opération de remplissage, les molécules longitudinales de cristal liquide se positionnent dans les microsillons générés sur les couches organiques d'alignement par l'opération de frottement.

Compte tenu du fait que les directions de frottement des couches d'alignement sont orthogonales, nous obtenons une structure en hélice caractéristique des LCD utilisés non seulement en projection mais aussi sur les moniteurs à vision directe. Cette structure est appelée « nématic en hélice » ou TN (*twisted nematic*). La cellule est complétée par un second polariseur, ou analyseur, dont la direction de polarisation est perpendiculaire à celle du premier polariseur.

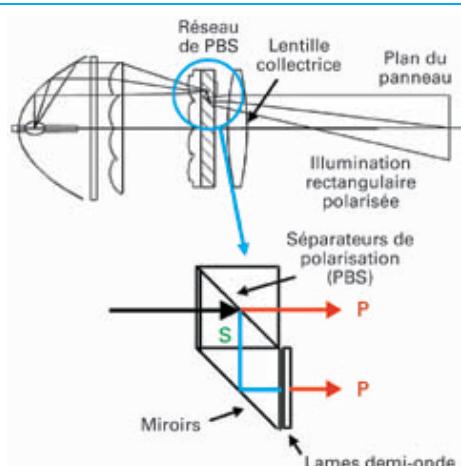


Figure 31 – Convertisseur de polarisation dans un système intégrateur à minilentilles

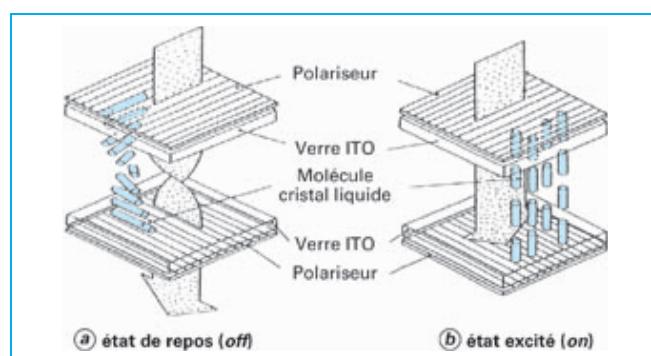


Figure 32 – Principe d'une cellule à cristaux liquides

#### 3.1.6.1 Principe électro-optique

À l'état de repos (figure 32), la lumière polarisée incidente voit sa direction de polarisation pivoter de 90°, du fait de la structure en hélice du cristal liquide TN. Elle se retrouve donc avec une polarisation parallèle à l'analyseur de sortie, qui la laisse par conséquent passer. L'état *off* correspond donc à un pixel blanc.

Dans l'état excité, c'est-à-dire lorsqu'une tension électrique de l'ordre de 4 à 5 V est appliquée entre les deux armatures ITO du condensateur pixel, les molécules s'alignent dans le sens du champ électrique, détruisant ainsi la structure hélicoïdale ; la polarisation de la lumière n'est plus tournée et est, par conséquent, absorbée par l'analyseur. L'état *on* correspond donc à un pixel noir.

En modulant la tension entre 0 et 5 V, il est possible de générer différents niveaux de gris suivant la courbe de la figure 33.

Ce type d'adressage, pour lequel le pixel est blanc lorsqu'on n'applique pas de tension, est appelé *normally white* (NW). Il prévaut dans tous les projecteurs à LCD transmissifs.

#### 3.1.6.2 Matrice active

Afin de constituer une image, les pixels sont organisés sous forme de matrice de lignes et de colonnes plus ou moins nombreuses suivant le type de résolution visée (SVGA, XGA, SXGA, TVHD...) (figure 34). Une matrice est dite active s'il existe un élément actif (transistor) à l'intersection de chaque ligne et de chaque colonne. Cet élément actif est un transistor en couche mince (TFT: *thin film transistor*) car les transistors monocristallins ne peuvent être implantés sur des supports en verre, les températures nécessaires à leur dépôt étant trop élevées.

Le TFT est réalisé en silicium amorphe (A-Si) sur substrat de verre pour les applications moniteurs LCD et en silicium polycristallin (P-Si) sur substrat de quartz pour la plupart des applications de projecteurs à valves transmissives comme nous le verrons plus loin.

Soulignons que toutes les valves utilisées en projection sont à matrice active car cette technique permet d'obtenir à la fois de bons contrastes (400 : 1) et une résolution d'image importante (1 280 × 1 024).

Le fonctionnement d'une matrice active est identique à celui des moniteurs LCD. Tous les transistors d'une ligne sont activés en même temps, les drivers colonnes fournissent alors les tensions vidéo analogiques qui sont chargées via le transistor pixel sur le condensateur pixel. Puis la ligne est désactivée, ce qui fait que les tensions analogiques sont mémorisées sur les capacités pixel jusqu'au prochain rafraîchissement qui interviendra lors de la prochaine trame vidéo. La ligne suivante est alors activée et le processus se poursuit jusqu'à ce que tout le panneau ait été complètement adressé.

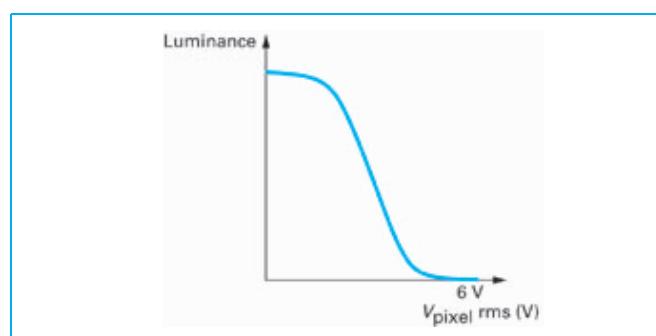


Figure 33 – Courbe électro-optique d'un panneau LCD transmissif à matrice active

### 3.1.6.3 Drivers intégrés

Contrairement aux moniteurs LCD qui ont des tailles importantes (15 à 40 pouces), les valves de projection doivent avoir de petites dimensions afin que le coût du système optique associé reste acceptable. Les tailles standards rencontrées sont 0,5, 0,7, 0,9, 1,3 et 1,8 pouce. Compte tenu de ces valeurs faibles, il était hors de question d'attacher des circuits de commande extérieurs (*drivers*) aux lignes et aux colonnes de la matrice active, le pas d'interconnexion étant beaucoup trop fin. C'est la raison pour laquelle ont été développées des techniques où les *drivers* sont intégrés sur le panneau (figure 35). Ce procédé a non seulement l'avantage de résoudre le problème de connectivité décrit ci-avant mais permet également de réduire le coût de la fonction d'affichage en supprimant le jeu de circuits intégrés qui sert habituellement à adresser les moniteurs LCD à vision directe.

Cependant, intégrer des *drivers* n'était pas chose aisée car le silicium amorphe ayant une conductivité très faible ( $0,5 \text{ à } 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), il était au début impossible de réaliser des circuits complexes de commande dans cette technologie. C'est la raison pour laquelle sont apparues les matrices actives en P-Si dont les transistors ont des mobilités 150 fois supérieures à celles du silicium amorphe. Malgré tout, les hautes températures impliquées dans le processus de fabrication P-Si n'étant pas compatibles avec les substrats de verre, les constructeurs ont été amenés à remplacer ces derniers par des substrats de quartz.

Aujourd'hui, toutes les valves transmissives des projecteurs LCD utilisent la technologie P-Si sur substrat de quartz. Des tentatives ont été initiées pour conserver un substrat de verre, moins cher. Citons-en deux :

- Thomson Multimedia et Thalès LCD ont développé dans les années 1990 une technique de *drivers* intégrés en silicium amorphe pour des valves de 2,2 pouces ;
- la technique dite P-Si basse température, qui est en développement pour le monde de la projection, et qui consiste à réaliser une matrice active à *drivers* intégrés en silicium amorphe sur substrat de verre et à cristalliser localement les transistors à l'aide d'un laser afin de les transformer en TFT P-Si. Le problème principal de cette technique est lié à l'obtention d'un recuit laser homogène sur toute la matrice.

### 3.1.6.4 Technique d'adressage de la valve

Le **driver ligne** est un registre à décalage qui sélectionne les lignes séquentiellement (figure 35). Les principaux signaux (outre les alimentations) qu'il reçoit du contrôleur extérieur sont :

- un signal de synchronisation verticale V qui indique le moment où la première ligne de vidéo active est présente en sortie des *drivers* colonnes ;
- une horloge à la fréquence ligne qui cadence le balayage vertical du panneau ;
- un signal de contrôle d'inversion haut-bas, nécessaire lorsque l'utilisateur désire accrocher le projecteur au plafond la tête en bas et doit donc retourner l'image. Lorsque cette information est active, le registre à décalage ligne adresse le panneau de bas en haut.

Le **driver colonne** est lui aussi un registre à décalage qui échantillonne la vidéo analogique entrante et la verrouille d'un bloc dans les capacités colonnes de l'afficheur. Les principaux signaux (outre les alimentations) qu'il reçoit du contrôleur extérieur sont :

- un signal de synchronisation horizontale H qui indique le moment où le premier pixel de vidéo active est présent en entrée du panneau ;
- une horloge à la fréquence point qui cadence le balayage vertical du panneau ;
- un signal de contrôle d'inversion droite-gauche, nécessaire lorsque l'utilisateur désire utiliser le projecteur en mode rétroprojection pour inverser l'image. Lorsque cette information est active, le registre à décalage colonne adresse le panneau de droite à gauche.

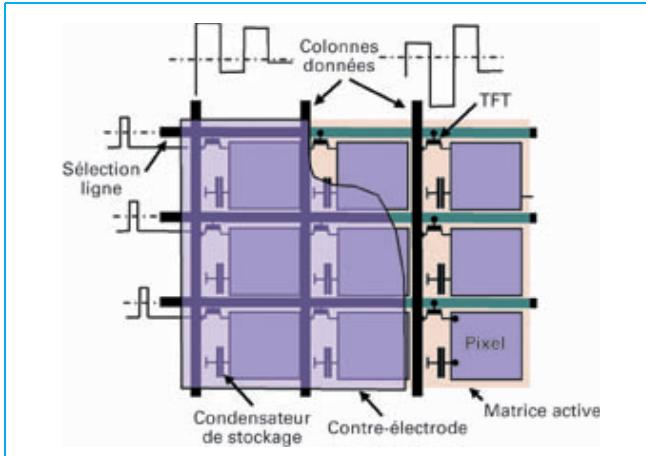


Figure 34 – Panneau LCD transmissif à matrice active

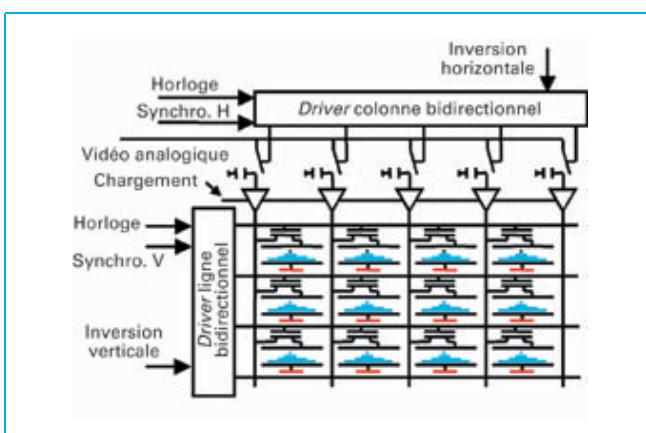


Figure 35 – Matrice active à *drivers* intégrés dans une valve P-Si

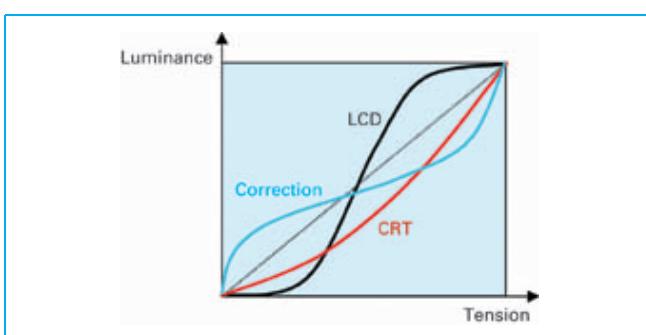


Figure 36 – Correction de gamma introduite dans un contrôleur LCD

Le schéma de principe décrit ci-avant est dans les faits un peu plus complexe en ce sens que, les *drivers* intégrés en P-Si étant limités en terme de vitesse, il est nécessaire de paralléliser l'information vidéo fournie au panneau afin de réduire la fréquence point du système (~50 MHz pour un panneau XGA : 1 024 × 768). Pour ce faire, il est par exemple possible d'envoyer de 4 à 8 signaux vidéo analogiques

qui adresseront chacun un quart, respectivement un huitième, du nombre des colonnes, réduisant ainsi la fréquence point à 12,5 MHz, respectivement 6,25 MHz, dans le cas de notre exemple.

Pour générer tous ces signaux, il est nécessaire de disposer en amont de la valve d'un contrôleur LCD.

### 3.1.6.5 Contrôleur LCD

Il a pour rôle :

- d'échantillonner les signaux vidéo d'entrée R, V, B ;
- de faire la correction de non-linéarité dite correction de gamma (figure 36). Compte tenu du fait qu'un LCD a une réponse électro-optique assez éloignée de celle d'un tube et que tous les signaux vidéo générés dans une carte graphique ou par une caméra de télévision sont calibrés pour adresser une technologie de moniteurs ou de téléviseurs basée sur des tubes, il est obligatoire de disposer d'une table de correspondance électronique qui corrige la réponse LCD de sorte que, vue de l'extérieur, elle soit équivalente à celle d'un tube ;
- d'inverser la vidéo régulièrement, toutes les lignes ou toutes les trames, afin d'éviter la migration ionique qui entraîne un dysfonctionnement de l'afficheur ;
- de démultiplexer le signal vidéo en plusieurs canaux (4 ou 8) afin de diminuer la fréquence horloge du panneau comme expliqué précédemment ;
- de fournir les signaux de commande des *drivers* lignes et colonnes ;
- de fournir le signal de *contreélectrode* qui est le plus souvent un signal alternatif carré afin de réduire la dynamique des *drivers* colonnes ;
- de fournir les alimentations adéquates pour le fonctionnement des *drivers* intégrés.

### 3.1.6.6 Principes des valves à microlentilles

À taille de valve constante, plus la résolution augmente, plus le taux de lumière interceptée par la matrice d'adressage augmente. On appelle **facteur d'ouverture** le rapport entre la surface transmissive d'un pixel et sa surface totale. Compte tenu des règles de dessin utilisées en silicium P-Si, une valve XGA (1 024 × 768) de 0,7 pouce aurait un facteur d'ouverture de l'ordre de 40 %, ce qui veut dire que 60 % de la lumière serait absorbée par la matrice d'adressage noire. Cela est bien entendu inacceptable dans le cadre d'applications nécessitant un flux lumineux supérieur à 1 000 lm.

C'est pour résoudre ce problème que les constructeurs proposent des valves équipées de microlentilles (une par pixel) qui sont chargées de concentrer la lumière dans la surface active ou transparente du pixel (figure 37).

La focale des microlentilles doit être précisément déterminée en fonction de l'étendue de la source et de la taille du pixel. Ce faisant, le facteur d'ouverture peut passer de 40 % à 70 %, ce qui constitue un gain de luminosité important.

Les microlentilles peuvent être réalisées suivant différents principes :

- en verre pressé ;
- par dopage ionique ;
- en résine pressée sur un substrat de verre ;
- intégrées dans le substrat du LCD.

**Nota :** les microlentilles, bien que très efficaces, affichent un prix jusque-là prohibitif pour les applications grand public. Par exemple, il n'existe pas de rétroprojecteur TVHD (1 920 × 1 080) utilisant des valves transmissives car elles seraient de grande taille (> 1,3 pouce) ou nécessiteraient l'adjonction de microlentilles pour obtenir le flux de sortie requis, ce qui, dans les deux cas, augmenterait leur prix de manière significative. Ce sont les raisons pour lesquelles les solutions technologiques pour adresser le marché de la rétroprojection grand public tendent à utiliser des valves de type réflectif LCOS ou DMD (§ 3.2).

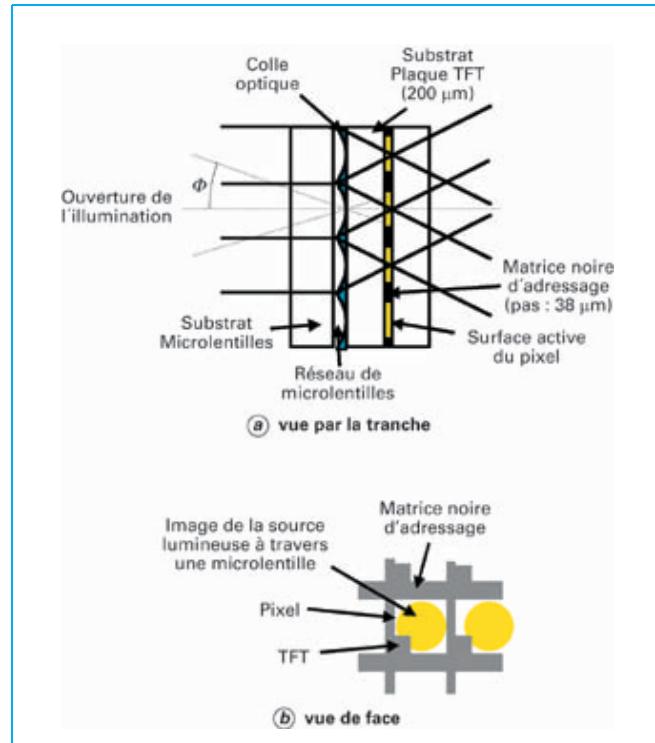


Figure 37 – Réseau de microlentilles sur une valve P-Si

### 3.1.7 Imagerie

Dans un projecteur 3-LCD, le système chargé de porter l'image depuis le panneau LCD jusqu'à l'écran est constitué de trois éléments :

- la recombinaison des couleurs ;
- l'objectif de projection ;
- la superposition des images.

■ **Système de recombinaison de couleurs :** il est, de nos jours, standardisé en fonction des tailles de valves LCD, elles-mêmes standardisées (§ 3.1.6). Il repose sur le principe d'un cube dichroïque qui laisse passer le faisceau vert et réfléchit les faisceaux rouge et bleu (figure 23). Compte tenu du fait que les faisceaux en question sont polarisés, il est souhaitable, pour obtenir une uniformité de couleur correcte, que le faisceau vert transmis soit polarisé en P et les deux autres faisceaux réfléchis soient polarisés en S (§ 3.1.5 : définition des types de polarisation), ce qui est un inconvénient en mode rétropréjection pour lequel il est préférable que les trois faisceaux R, V et B arrivent sur le miroir avec une polarisation identique et de type S. Cependant, des composants optiques particuliers (ColorSelect™ de ColorLink) peuvent être ajoutés en sortie du cube afin de tourner la polarisation verte de 90° pour la transformer en S, tout en laissant les autres inchangées.

■ **Objectif de projection :** il est chargé du agrandissement de l'image qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 70 lorsque la taille de la valve est de 0,7 pouce et l'écran de visualisation de 50 pouces, alors que le agrandissement est dix fois moindre dans le cas de rétroprojecteurs à tubes de 7 pouces. En conséquence, un objectif de projecteur LCD a des spécifications en termes de résolution, de chromatisme latéral, de distorsion et de plan de focalisation beaucoup plus contraintes que dans le cas d'un système à tubes. Les objectifs de rétropréjection ont des focales fixes et courtes alors que les objectifs pour

projecteurs frontaux sont plus sophistiqués car ils doivent être munis de zooms et de bagues de réglage de la netteté. Sur les modèles haut de gamme, ces réglages sont motorisés et accessibles par l'utilisateur via la télécommande.

Sur les projecteurs frontaux récents, il est également possible de corriger électroniquement l'effet de trapèze induit lorsque l'axe de projection n'est pas parfaitement perpendiculaire à l'écran et ce en vertical et en horizontal. Cette caractéristique est très intéressante lorsque l'utilisateur désire placer l'appareil dans un coin de la salle et non pas au milieu des spectateurs. L'inconvénient est que les techniques de filtrage numérique mises en jeu réduisent la résolution de l'image.

**Système de superposition des images :** il est quant à lui beaucoup plus simple que dans le cas d'un projecteur à tubes. En effet, le fait d'utiliser des panneaux de très petite taille permet de se contenter d'un système mécanique de superposition des trois panneaux R, V et B suivant les axes x et y. Un réglage supplémentaire suivant l'axe z (profondeur) assure que les trois images soient correctement focalisées. Une fois les trois panneaux parfaitement ajustés en usine, ils sont collés sur leur support mécanique.

### 3.1.8 Cas particulier des projecteurs mono-LCD

Nous avons vu que, de nos jours, les projecteurs LCD transmissifs utilisent tous des systèmes trivalves. Les projecteurs mono-LCD sont apparus dans certains produits par le passé. L'intérêt principal de cette technique résidait dans le fait qu'elle permettait de réduire le coût du moteur optique de manière significative en utilisant des architectures optiques très simples. Cependant, cela se traduisait inévitablement par une perte de flux non négligeable.

Les premiers systèmes de projection monovalve qui sont apparus utilisaient des LCD à filtres colorés R, V, B. Le moteur optique était constitué d'une lampe dans son réflecteur, d'un intégrateur, d'une lentille de champ, de la valve elle-même et de l'objectif de projection.

Les deux défauts majeurs de cette structure étaient :

- une faible efficacité lumineuse. Les deux tiers de la lumière étaient absorbés par les filtres colorés ;
- une élévation de température du composant due à cette absorption.

Les systèmes spatio-chromatiques étaient efficaces mais nécessitaient une lampe à arc très court.

## 3.2 Projecteurs à valves réflectives

Comme indiqué au paragraphe 3.1.6 traitant des valves LCD transmissives, il est délicat avec cette technologie d'obtenir à la fois des résolutions importantes (TVHD), un flux de sortie, un contraste et un coût compatible avec la rétroprojection grand public. C'est dans cette perspective qu'ont été développées un grand nombre de solutions à base de valves LCD réflectives ou LCOS.

Pendant ce temps, la tendance du marché de la projection frontale professionnelle a été de réduire l'encombrement et la masse des appareils de manière à les rendre « ultraportables ».

Nous allons détailler dans les prochains paragraphes les différents principes de moteurs optiques utilisant ces composants.

### 3.2.1 Technologie 3-LCOS

Le principe de base consiste à construire une matrice active, non plus sur un substrat de quartz comme précédemment, mais sur un substrat de silicium monocristallin, substrat utilisé déjà depuis plusieurs décennies pour la réalisation de circuits intégrés. Sur la surface

des pixels ainsi créés, est déposée une couche d'aluminium dont le rôle sera de réfléchir la lumière incidente. Par la suite, il suffit d'assembler une plaque de verre recouverte d'ITO pour faire office de contre-électrode et de remplir le tout de cristal liquide, en utilisant le même type d'assemblage que celui utilisé dans l'industrie LCD classique. Une fois le composant réalisé, il est possible de l'implanter au sein d'une architecture optique telle que celle présentée sur la figure 38.

Le moteur optique présenté est dit « hors axe » car l'axe d'illumination n'est pas perpendiculaire au plan du LCOS. La lumière incidente polarisée qui arrive sur le composant se réfléchit sur la couche d'aluminium sans être modifiée lorsque la tension électrique appliquée sur le pixel est quasi nulle. L'analyseur de sortie ayant son axe de polarisation placé perpendiculairement à celui du polariseur, la lumière est bloquée. Le pixel est noir.

Inversement, en appliquant 5 V sur le pixel, l'axe de polarisation de la lumière est tourné de 90° et la lumière passe à travers l'analyseur. Le pixel est blanc.

Le fonctionnement décrit est donc de type « normalement noir » (NB : *normally black*). Contrairement aux valves transmissives qui ne fonctionnent qu'en mode « normalement blanc », les LCOS peuvent fonctionner dans les deux modes à condition d'utiliser des mélanges de cristaux liquides et des épaisseurs de cellule différentes.

**Nota :** pour améliorer la réflectivité des LCOS jusqu'à 90 %, il est possible d'implémenter sur les couches d'aluminium des couches optiques additionnelles à base d'oxydes de silicium ( $\text{SiO}_x$ ) ou de nitrures de silicium ( $\text{SiN}_x$ ).

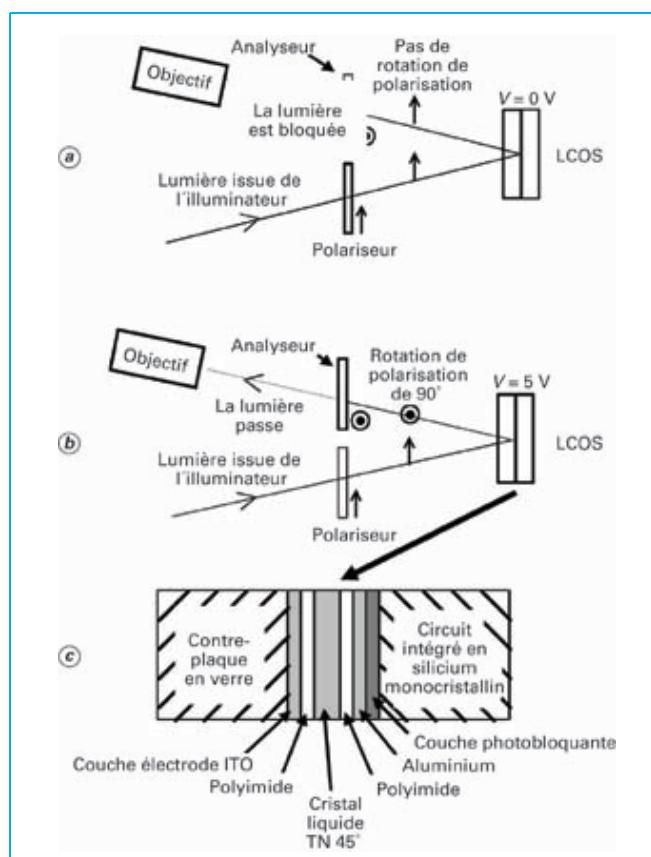


Figure 38 – Système LCOS-normalement noir. Illuminateur hors axe

Comme pour un LCD, on génère des niveaux de gris en modulant la tension analogique de commande. Il est cependant à noter qu'il existe des LCOS dits ferroélectriques dont les temps de réponse très courts ( $10 \mu\text{s}$  versus  $10 \text{ ms}$  pour les TN) autorisent de mettre en place des adresses numériques à modulation de largeur d'impulsion identiques aux techniques utilisées dans les écrans plasma [R 610] [R 612] [R 614]. Malgré cela, les LCOS ferroélectriques ne sont pas envisageables pour les applications de projection car trop sensibles aux variations de température, entre autres problèmes.

Les principales caractéristiques des LCOS par rapport aux LCD classiques sont :

- une résolution indépendante de la taille de l'image. En effet, il n'y a plus d'atténuation du flux dû à la matrice active car elle ne se trouve plus sur le chemin lumineux, elle est incrustée dans le silicium. Cela permet d'avoir des facteurs d'ouverture de l'ordre de 90 % sans avoir recours au bon soin des microlentilles ;

- les pas de pixels peuvent descendre jusqu'à moins de  $10 \mu\text{m}$ , ce qui permet de concevoir des valves TVHD de l'ordre de 0,8 pouce de diagonale au format 16/9. La conception de systèmes optiques à des coûts plus abordables devient alors possible ;

- les matrices actives sont réalisées sur des chaînes de fabrication de circuits intégrés classiques, ce qui permet là aussi d'obtenir des coûts de production plus faibles. De plus, contrairement aux valves LCD pour lesquelles il existe très peu de constructeurs, les LCOS sont *a priori* disponibles chez plus d'une dizaine de fabricants.

Toutes ces raisons font que le LCOS est un composant idéal pour les applications de rétroprojection TVHD grand public.

En fait, cette technologie a, historiquement, fait ses débuts à la fin des années 1990 en adressant le marché des oeillets pour appareil photo numériques, caméscopes et autres lunettes de réalité virtuelle. Au début des années 2000, des entreprises d'électronique grand public ont développé des solutions pour la rétroprojection (Samsung, Thomson...). Ces produits n'ont pas eu de véritables succès commerciaux car les prix de vente proposés étaient à l'époque très élevés (environ 8 000 \$). Depuis 2004, une nouvelle génération de RPTV 3-LCOS a fait son apparition. Elle est basée sur une technologie à cristaux liquides plus adaptée au marché, appelée Vertically Aligned Nematic (VAN). Cette technologie commence à être bien répandue. En 2006, JVC et Sony proposent notamment des produits intéressants à moins de 3 000 \$ pour 50 pouces de diagonale, qui entament sérieusement les parts du marché détenues par la technologie DLP.

Dans le monde de la projection frontale, il existe des projecteurs SXGA ( $1\,280 \text{ pixels} \times 1\,024 \text{ pixels}$  de Hitachi) dont la qualité commence à rivaliser avec les projecteurs LCD.

Contrairement aux LCD transmissifs, il n'existe pas vraiment de standard en terme de taille de valve. On trouve des LCOS de 0,55, 0,78, 0,83, 0,9, 1,1 et 1,3 pouce. Cela constitue un obstacle au développement de ce concept. Le jour où le moteur optique idéal aura été conçu, on devrait assister à un accroissement des volumes.

Plusieurs solutions de moteurs optiques ont été développées par différentes compagnies.

**Moteur optique hors axe** : développé par S-Vision, cette solution (figure 38) présente l'avantage d'avoir un très bon contraste puisque l'analyseur de sortie peut être ajusté indépendamment du polariseur. L'inconvénient majeur provient du fait que la conception d'un objectif de rétroprojection hors axe est assez complexe. De même, utiliser un séparateur de couleurs et un cube de recombinaison de couleurs en dehors des axes privilégiés de ces composants amène des problèmes de non-uniformité de couleurs (figure 39).

Dans ce cas de figure, l'illuminateur est de même type que celui traité au paragraphe 3.1.4 (figure 30a). Il semble qu'il n'y ait pas de produits utilisant cette technologie sur le marché en 2006.

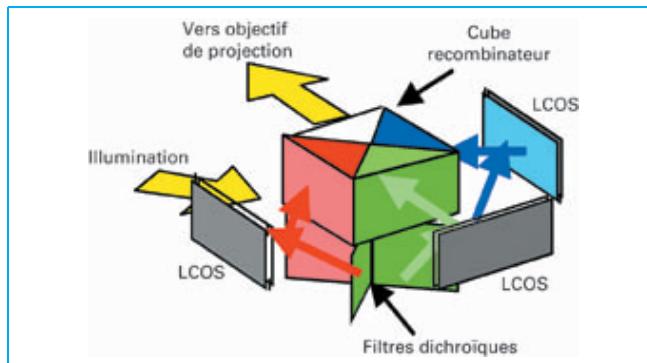


Figure 39 – Gestion des couleurs sur système hors axe

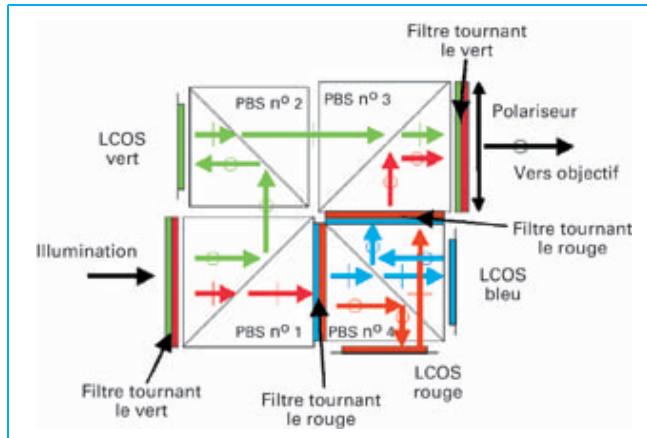


Figure 40 – Gestion des couleurs sur système sur l'axe

**Moteur optique sur l'axe** : nous ne présenterons ici que le plus répandu (Thomson, Hitachi) (figure 40). Il est basé sur deux composants de ColorLink :

- le ColorQuad™ composé de quatre PBS ;
- le ColorSelect™ qui a la propriété de tourner la polarisation de certaines longueurs d'onde sans affecter les autres.

Le faisceau blanc est issu en général d'un intégrateur du type de la figure 30c à barreau intégrateur. Il est polarisé en P et passe à travers un premier filtre ColorSelect™, dit magenta, qui tourne la polarisation du vert de  $90^\circ$  et laisse le bleu et le rouge (magenta) intacts. Le PBS n° 1 réfléchit le faisceau vert polarisé S et laisse passer le bleu et le rouge, le PBS n° 2 réfléchit à son tour le faisceau vert vers le LCOS correspondant qui module l'information lumineuse sur chaque pixel en fonction du contenu vidéo et la renvoie vers l'objectif. L'opération est reproduite de la même façon sur les deux autres LCOS.

En fin de chaîne, un dernier filtre magenta redonne la même polarisation à tous les faisceaux avant de pénétrer dans l'objectif. Comme nous l'avons vu pour les rétroprojecteurs LCD, la polarisation finale doit être S pour attaquer le miroir de rétroprojection.

Les spécificités de ce type de gestion de couleurs sont les suivantes :

- moins cher qu'un système hors axe ;
- un grand nombre de composants optiques est nécessaire, quatre PBS, quatre ColorSelect™, l'assemblage est complexe ;

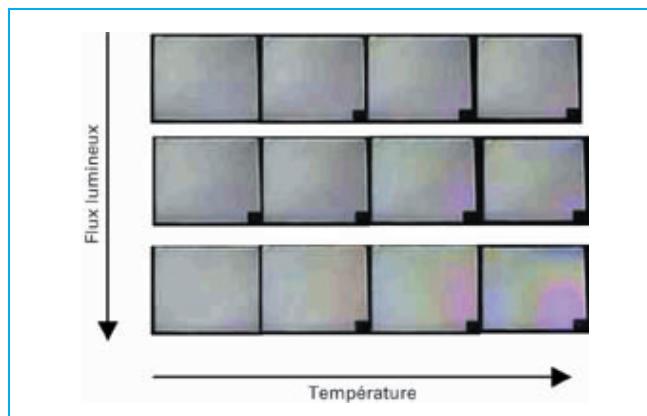


Figure 41 – Sensibilité d'un PBS à la température

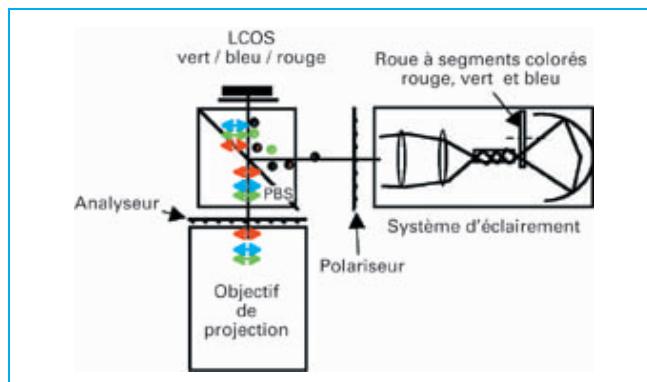


Figure 42 – Projecteur mono-LCOS à roue colorée

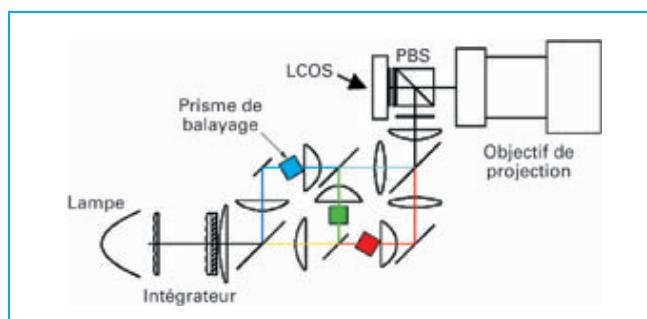


Figure 43 – Projecteur mono-LCOS (Philips)

- le contraste est bon puisque la lumière traverse quatre fois des séparateurs de polarisation ;
- l'uniformité de couleur est médiocre (figure 41) puisque les PBS sont des composants biréfringents très sensibles à des gradients de température ou à des stress mécaniques ;
- afin d'améliorer le contraste, on est amené à disposer sur chacun des LCOS une lame à retard quart d'onde qui compense des défauts amenés par les PBS aux forts angles d'illumination (*skew rays*). En effet, lorsque l'on s'éloigne de l'incidence 45° sur un PBS ( $\pm 10^\circ$ ), des effets de rotation de polarisation indésirables sont induits qui génèrent une non-uniformité de contraste.

### 3.2.2 Systèmes à 1-LCOS

Compte tenu de la complexité des systèmes 3-LCOS, certains constructeurs ont développé des composants et des systèmes optiques pouvant fonctionner avec un seul LCOS (figure 42).

Toutes ces idées ont en commun le fait d'utiliser une technique dite « couleur séquentielle » qui consiste à illuminer l'unique composant successivement par des faisceaux rouge, vert et bleu.

Contrairement aux systèmes 3-LCOS, les systèmes 1-LCOS ont en général une optique très simple, basée sur une illumination à roue colorée de type DMD (§ 4.1). Le principal défi consiste à concevoir des composants LCOS dont le cristal liquide et l'électronique de commande puissent être suffisamment rapides pour supporter des taux de rafraîchissement de  $3 \times 60$  Hz, voire  $6 \times 60$  Hz. En effet, les temps de réponse classiques des LCD avoisinent 10 ms à 40 °C. Or, pour faire fonctionner un LCOS en mode « couleur séquentielle », il faut développer des cellules cristal liquide répondant en 1 ms, voire moins. MicroDisplay Corporation (Californie) a, par exemple, développé un composant SXGA de 0,9 pouce dont le temps de descente est de 0,2 ms et qui peut fonctionner à des fréquences de rafraîchissement de 450 Hz [1].

Comme nous le verrons au paragraphe traitant des DMD (§ 4.1), le principal artefact apporté par l'architecture « couleur séquentielle » est un effet arc-en-ciel visible sur les bords des objets en mouvement (*color break up*) et qui est dû au fait que l'œil, ayant tendance à suivre un objet dans son mouvement, peut déceler les trois positions occupées successivement par les trois composantes primaires de l'objet. Pour masquer ce phénomène indésirable, il est fondamental de fonctionner à 300 Hz pour des images à l'origine de 50 Hz (360 Hz pour des images de 60 Hz).

Bien entendu, tout comme les filtres colorés des LCD transmissifs, le principe « couleur séquentielle » a une efficacité lumineuse de 33 % puisque deux tiers de la lumière incidente sont rejetés par la roue colorée.

C'est ainsi que, pour contrecarrer ce problème, Philips [2] a développé un système de « couleurs déroulantes » à base de prismes tournoyants (figure 43) qui génère sur la valve, au même instant, trois bandes colorées horizontales rouge, verte et bleue qui balayent le panneau de haut en bas. Par ce procédé, tout le spectre de l'illuminateur est utilisé (aux pertes près).

Cependant, il est à noter que, compte tenu des règles de l'étendue géométrique (voir encadré), l'efficacité lumineuse n'est optimale que pour de grandes tailles de LCOS (1,3 pouce). Si on diminue la taille à 0,8 pouce, par exemple, on se retrouve sensiblement avec le même flux de sortie qu'avec le système dit à « couleurs séquentielles ».

C'est la raison pour laquelle Philips a récemment abandonné cette idée et a arrêté la production. En 2004, Intel a également tenté de développer un composant LCOS pour système mono-imageur. Ce composé entièrement numérique disposait d'une cellule mémoire complexe sous chaque pixel pour optimiser la luminosité du projecteur. Malheureusement, la très grande complexité de la puce entraînait de faibles rendements et le développement a là aussi été arrêté.

En février 2006, un consortium d'entreprises et d'universités européennes (Thomson, Atmel, Merck, Thales LCD, Imec, UCL) ont réussi à démontrer un nouveau concept de LCOS  $1\ 920 \times 1\ 080$  avec une mémoire sous le pixel simplifié qui utilise une technologie CMOS 5 V tout à fait classique et qui rendrait sa fabrication beaucoup plus aisée que dans le cas des solutions citées précédemment. Ce consortium se nomme LCOS4LCOS (Liquid Crystal on Silicon for Low Cost Optical Systems).

### 3.2.3 Systèmes à 2-LCOS

Les projecteurs 3-LCOS étant complexes au niveau de la gestion des couleurs, et donc relativement chers, et les projecteurs 1-LCOS ne pouvant fournir qu'environ 200 à 250 lm, certains constructeurs travaillent à une solution de compromis, à savoir des systèmes à 2-LCOS.

L'idée consiste à utiliser une architecture à un seul PBS identique à la figure 42 et d'ajouter un second LCOS, correspondant à la voie rouge, en face de l'éclairage. Un composant de type ColorSelect™ à l'entrée du PBS transforme la polarisation S du rouge en P; ainsi, seules les longueurs d'onde verte et bleue sont réfléchies vers le premier LCOS et le spectre rouge traverse le PBS. Il suffit alors de disposer d'une roue colorée à deux segments (magenta et jaune) pour générer ce système à deux couleurs séquentielles (figure 44).

Il est également possible de remplacer la roue colorée par un composant de type ColorSwitch™ fabriqué par ColorLink (figure 44). Il a en effet la particularité de tourner la polarisation de 90° soit du vert, soit du bleu sous l'action d'une tension électrique délivrée par un générateur externe, synchrone du balayage des LCOS. Le rouge reste inchangé.

### 3.3 Spécificités de la rétroprojection LCD

■ **Speckle**: le *speckle*, ou granularité, est un phénomène qui apparaît lorsque l'on utilise des moteurs optiques dont les objectifs ont de petites pupilles, ce qui est le cas de tous les projecteurs autres que CRT, à partir du moment où la source d'image est de faible dimension (LCD, LCOS, mais aussi DMD).

Pour simplifier, il se traduit par un aspect « sableux » de l'image provenant de micro-interférences, au niveau de l'écran, entre les différents rayons issus de la pupille de l'objectif. Compte tenu de la faible dimension de celle-ci par rapport à la distance de projection, les rayons lumineux sont quasi cohérents entre eux et des interférences constructives et destructives apparaissent (de la même façon que lorsque l'on fait interagir deux rayons laser issus d'une même source).

Ce phénomène n'est pas présent sur les rétroprojecteurs CRT car les sources d'image sont environ dix fois plus grandes (7 pouces au lieu de 0,7 pouce).

■ **Diminution de la profondeur**: contrairement aux rétroprojecteurs à tubes, la technologie LCD, et notamment LCOS, offre des opportunités intéressantes en terme de diminution de la profondeur des appareils.

En effet, l'extrême compacité des moteurs optiques, associée au fait qu'il n'y a qu'un seul objectif, permet de concevoir celui-ci de manière à ce que l'angle de projection soit fortement augmenté et, donc, la distance de projection réduite. En revanche, il faut prévoir un système de correction électronique des distorsions de l'image induite par de si courtes focales. C'est la raison pour laquelle la technologie LCOS offre des avantages non négligeables vis-à-vis des technologies concurrentes puisqu'il y a moins de limitations à l'augmentation de la résolution de l'image, ce qui est nécessaire pour faire des corrections électroniques acceptables.

### 3.4 Applications

Les projecteurs LCD transmissifs sont fabriqués par une cinquantaine de compagnies dans le monde et s'adressent en grande majorité au marché de la projection frontale pour salle de réunion ou de

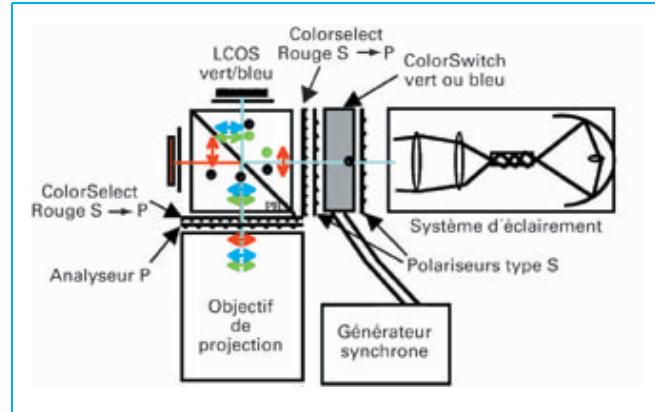


Figure 44 – Projecteur bi-LCOS à ColorSwitch™

conférence. La plupart des acteurs japonais proposent des produits à base de valves LCD de l'ordre de 0,7 pouce avec des résolutions ne dépassant guère 1 280 × 720 en 16/9.

La projection frontale LCOS s'adresse plus particulièrement au marché du Home Cinema. La rétroprojection LCOS quant à elle a commencé à apparaître vers 2003-2004 dans les rétroprojecteurs allant jusqu'à 70 pouces. Il s'agit principalement de Sony et JVC.

## 4. Éléments micromécaniques

Les éléments micromécaniques, ou MEMS (*micro-electro-mechanical system*), sont constitués de micromiroirs qui se déforment ou changent de position sous l'effet d'un champ électrique. Il en existe de deux types :

- les miroirs fonctionnant en déviation (DMD) (§ 4.1) ;
- les miroirs fonctionnant en diffraction (GLV : *grating light valve*) (§ 4.2).

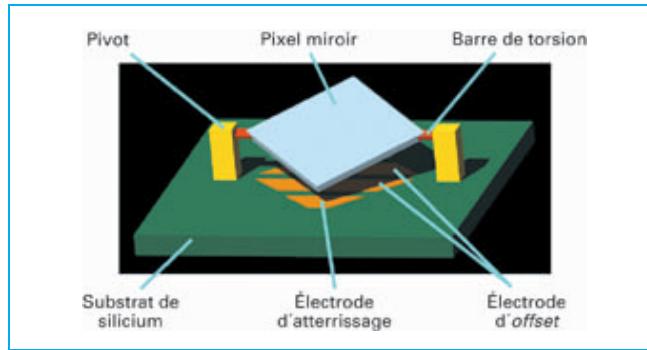
### 4.1 DMD

Les premiers prototypes de projecteurs sont apparus au milieu des années 1990 et ont été développés par Texas Instruments. Le principe du micromiroir ou DMD (*digital micro-mirror device*) est présenté sur la figure 45. Chaque pixel est constitué d'un miroir en aluminium qui, sous l'effet d'un champ électrique, peut pivoter entre deux positions stables (*on/off*).

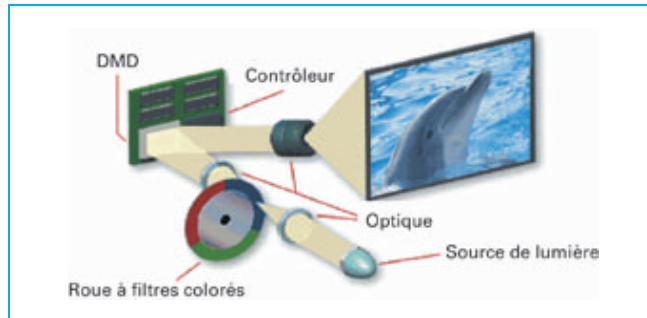
Tout comme les LCOS, les DMD sont fabriqués sur substrat de silicium mais nécessitent plus de niveaux de masquage (une vingtaine contre une quinzaine pour les LCOS).

Contrairement aux LCOS, les DMD sont des composants numériques ne pouvant afficher que deux valeurs de luminosité : blanc ou noir. Pour afficher des niveaux de gris, on aura recours aux mêmes techniques de modulation de largeur d'impulsions (PWM : *pulse width modulation*) que celles utilisées dans les écrans plasma [R 610] [R 612] [R 614]. Cela est rendu possible par le fait que les temps de réponse des DMD sont très courts, de l'ordre de 12 à 15 µs (contre 10 ms pour les LCD).

Lorsque le DMD est en position *on* (blanc), la lumière issue du système d'éclairage est réfléchie vers la pupille de l'objectif de projection. En position *off* (noir), la lumière est envoyée vers un élément absorbant.

**Figure 45 – Structure de base d'un micromiroir DMD**

(doc. Texas Instruments)

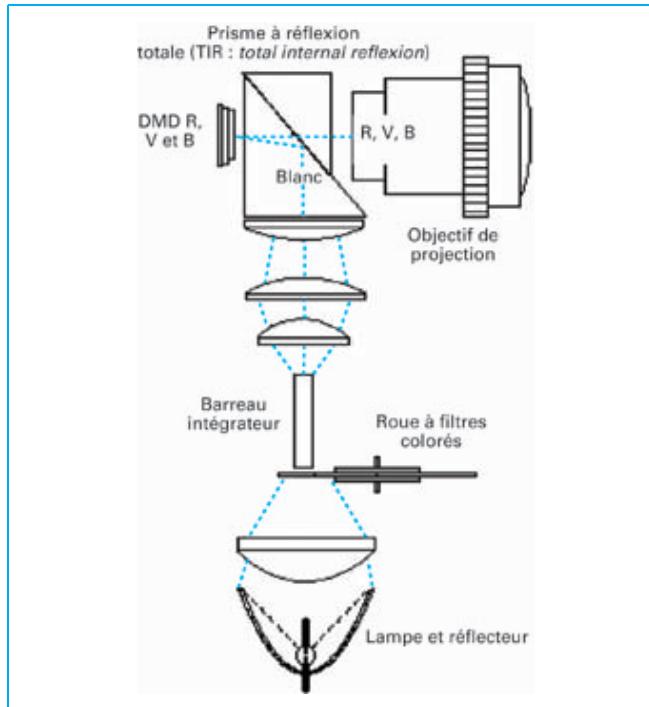
**Figure 46 – Moteur optique à base de DMD. Système DLP**

(doc. Texas Instruments)

Le moteur optique utilisant les DMD a été appelé DLP™ par son inventeur (Digital Light Processing). Son principe (figures 46 et 47) repose sur un système d'illumination à base de barreau intégrateur (§ 3.1.4), d'une roue à segments colorés qui va venir éclairer le DMD successivement avec des faisceaux rouge, vert et bleu, d'un prisme à réflexion totale qui dirige la lumière vers le DMD et récupère le signal optique modulé, et d'un objectif de projection.

Les principales caractéristiques de cette technologie sont :

- la lumière n'a pas besoin d'être polarisée (contrairement au LCD), d'où une meilleure efficacité lumineuse ;
- le pas des pixels est de l'ordre de 12 à 14 µm. Contrairement au LCOS, réduire cette valeur autour de 10 µm, pour viser les applications TVHD grand public, n'est pas chose aisée ;
- la réponse électro-optique est linéaire (comme les écrans plasma), d'où une certaine difficulté à coder les niveaux de gris sombres. La technique PWM ne permet pas à elle seule d'atteindre 9 bits de dynamique sur le vert. On est obligé d'avoir recours à des techniques de distribution spatiale (*dithering*) pour générer tous des niveaux de gris, ce qui provoque des images légèrement bruitées ;
- présence d'irisation sur les objets en mouvement, ou lorsque l'œil se déplace sur l'écran. Ce phénomène dit de *color break up* provient, comme nous l'avons vu pour les systèmes mono-LCOS, du fait que le DMD est adressé en mode « couleurs séquentielles ». Sur un objet en mouvement, l'œil humain parvient à discerner les différentes sous-trames colorées. Pour éviter cela, il faut augmenter les fréquences de rafraîchissement du DMD. Actuellement, il est possible de monter jusqu'à 900 Hz, mais cela se fait au détriment de la qualité de rendu des niveaux de gris évoquée plus haut, l'électronique de commande ayant ses propres limites en terme de fréquence de travail ;
- pour les applications de projection frontale de type salle de réunion, il est possible d'augmenter la luminosité, en insérant un

**Figure 47 – Système DLP** (d'après Texas Instruments)

segment blanc sur la roue colorée. Cela entraîne bien évidemment une désaturation des couleurs qui serait inacceptable pour des applications de télévision ;

— enfin, le principal atout de cette technologie provient du fait que, pour les applications de projection frontale professionnelles, il est possible de réaliser des moteurs optiques extrêmement compacts et légers (~1 kg), ce qui fait de cette technologie un leader incontesté sur ce segment de marché.

Un des obstacles à l'élargissement des DMD au marché grand public est qu'il n'y a qu'une seule source de composants clés : Texas Instruments. Ils disposent d'une gamme de DMD allant de 0,5 pouce 480 lignes à 0,8 pouce 720 lignes mais ne possèdent pas à l'heure actuelle de 0,8 pouce à 1 080 lignes. Pour parvenir à cette résolution, Texas Instrument a développé une puce spécifique de 540 lignes associée à un système optique à base de miroir vibrant de manière à recréer artificiellement, par entrelacement, les 1 080 lignes désirées (2 × 540).

Cette technique assez complexe est appelée *smoothing*. Elle permet de plus de réduire la taille de la puce et donc le coût du système.

## 4.2 GLV : grating light valve

Contrairement aux DMD qui utilisent un principe de déviation, les GLV sont des MEMS qui utilisent un principe de diffraction pour la modulation du faisceau lumineux.

Le principe de la projection par diffraction (*Optique Schlieren*) est d'utiliser le modulateur électro-optique comme un réseau de diffraction variable. La lumière est alors ou bien diffractée dans la bonne direction et passe alors à travers les masques du système sans atténuation, ou bien renvoyée vers des lucarnes où elle est absorbée. Elle n'atteint donc pas l'écran (figure 48).

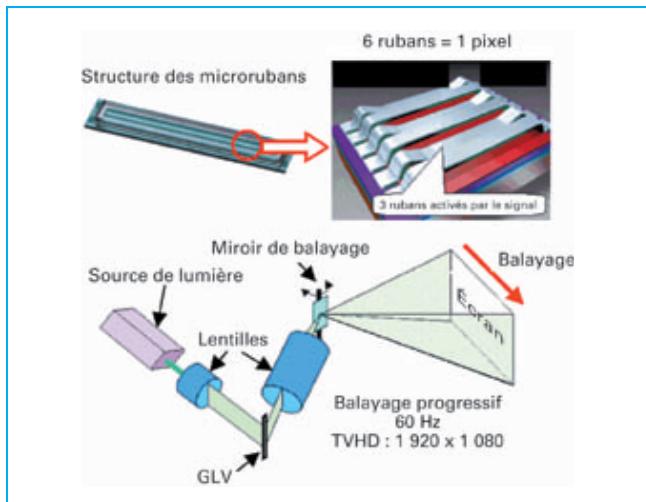


Figure 48 – Système de projection par diffraction GLV

Le fonctionnement des GLV repose sur un système de microrubans ou micro-fils.

Il a été développé par une start-up, Silicon Light Machine, et se présente sous la forme d'un système réflectif à base de silicium. La lumière est modulée par un réseau de diffraction variable linéaire formé par des fils qui, sous l'action d'un champ électrostatique, change de position et crée alors un réseau unidimensionnel avec les fils adjacents. Un système de balayage optique est alors nécessaire pour générer une image complète.

### 4.3 Applications

Le système GLV a été adopté par Sony, qui a développé un système de projection professionnel basé sur ce concept.

Les DLP sont quant à eux très répandus sur le marché des projecteurs professionnels nomades ultraportables (1 kg). Ils sont très largement répandus dans les applications de rétroprojecteurs sur table pour le segment du grand public. À noter également que des projecteurs de très haut flux à trois DMD (12 000 lm) sont présents sur le marché du cinéma électronique professionnel (Christies).

## 5. Notion de rendement lumineux

L'efficacité lumineuse des projecteurs que nous venons d'étudier et qui sont à base de modulateur électro-optique ou valve (LCD, LCOS, DMD) est raisonnablement faible, de l'ordre de 5 % pour une application de rétroprojection grand public par exemple. Nous allons dans ce paragraphe expliquer les raisons de cette situation ainsi que les limitations fondamentales fixées par le principe de l'étendue géométrique d'un faisceau lumineux (voir encadré).

Indépendamment des technologies utilisées qui ont été décrites plus haut, un projecteur à base de valves est constitué par quatre parties plus ou moins distinctes :

- le système d'éclairage (§ 5.1) ;
- le module de gestion des couleurs (§ 5.2) ;
- la modulation électro-optique (§ 5.3) ;

– la formation d'image et le cabinet de rétroprojection (§ 5.4).

Chaque partie affecte bien entendu le flux lumineux. Nous allons décrire d'une façon sommaire ces quatre parties afin de comprendre l'origine des pertes dans le flux lumineux de la lampe jusqu'à l'écran de projection.

### 5.1 Système d'éclairage ou de collection

Ce système a pour fonction de collecter la lumière de la lampe qui rayonne pratiquement dans la majeure partie de l'espace. Cette collection se fait par un réflecteur de type parabolique ou elliptique. Le réflecteur de la lampe est muni d'une couche diélectrique qui réfléchit la lumière visible et transmet le rayonnement infrarouge. Cette opération se traduit par une perte d'environ 20 % du flux de la lampe.

Le flux ainsi collecté ne peut être utilisé pour éclairer directement la valve pour deux raisons :

- uniformité d'éclairage insuffisante ;
- nécessité de polariser le flux, pour les applications LCD/LCOS uniquement.

Afin d'obtenir une uniformité suffisante (supérieure à 40 %), on utilise un système optique dit « intégrateur » qui a pour fonction de transformer le flux de distribution non uniforme en sortie du réflecteur circulaire en un éclairage très uniforme (> 70 %) avec le même format que celui de la valve (par exemple 4/3 ou 16/9). L'efficacité de ces systèmes d'intégration est liée à l'étendue d'origine de la source (voir encadré pour la définition de la notion d'étendue géométrique). Elle est de l'ordre de 40 à 50 % du flux de la lampe.

Étant donné que le flux émis par la lampe possède une polarisation aléatoire, on est amené, pour éclairer une valve de type LCD/LCOS avec une polarisation linéaire, à séparer le flux non polarisé en deux polarisations linéaires orthogonales. Une seule polarisation étant utilisée, la perte additionnelle est d'au moins 50 %. Bien entendu, on a cherché à tourner la polarisation inutile de 90° de manière à la réinjecter dans le système (§ 3.1.5). Ce mécanisme que l'on nomme « retour de polarisation » ou « convertisseur de polarisation » utilise des lames à retard dites demi-onde et ne peut se faire sans séparation physique (angulaire ou spatiale) des deux faisceaux. Il entraîne, d'une part, une complication du système (plus de composants et donc plus de pertes) et, d'autre part, agrandit l'étendue du faisceau (augmentation de la surface ou de l'angle solide).

En résumé, toutes pertes confondues, un système d'éclairage a une efficacité dans le meilleur des cas, de l'ordre de :

- 30 % pour une valve LCD ;
- 40 % pour un DMD.

### 5.2 Module de gestion des couleurs

Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1.2, ce module a pour fonction de séparer le faisceau en trois bandes spectrales – rouge, verte et bleue. La technique de séparation est différente suivant que nous nous situons dans une architecture à une ou à trois valves. Pour le système de projection à trois valves, le faisceau blanc d'origine est séparé physiquement en trois directions et chaque faisceau est alors dirigé vers la valve correspondante (figure 23). Les pertes colorimétriques proviennent du découpage du spectre blanc, des pertes dans la balance des couleurs (§ 3.1.2) ainsi que des pertes de transmission des filtres qui séparent les couleurs. Dans ce cas, les pertes peuvent atteindre 55 % du flux pour une colorimétrie bien optimisée dans le cadre d'applications télévisuelles.

En revanche, pour des systèmes de projection à une seule valve, une roue colorée est incorporée de façon à éclairer successivement la valve avec trois faisceaux séquentiels rouge, vert et bleu, chacune des couleurs étant active durant un tiers du temps alloué à la trame (6,67 ms pour une image à 50 Hz). Cette roue a alors une efficacité limitée à un tiers du flux à laquelle s'ajoutent les pertes par transmission de la roue elle-même. Cette opération se traduit par une efficacité de l'ordre de 18 %.

### 5.3 Modulation électro-optique

Les pertes introduites par la valve électro-optique sont fonction des technologies utilisées. Elles peuvent être classées en deux catégories :

- les pertes de transmission ou de réflexion dues à la géométrie du pixel (appelé communément le taux d'ouverture) ;
- les pertes dues à la polarisation et autres effets de modulation.

**Pertes dues à la géométrie** : pour les valves transmissives à base de technologie LCD, ces pertes sont fonction de la résolution de la valve. Plus le pixel est petit (15 à 20 µm), plus la partie active (ou transparente) du pixel est faible. Cela est dû à la place non négligeable que prend le transistor dans le pixel. Les fabricants de projecteurs LCD, essentiellement japonais, ont fait des efforts remarquables ces dernières années pour limiter ces pertes en augmentant le taux d'ouverture. Elles sont aujourd'hui limitées à environ 30 % à 40 % pour des valves XGA par exemple (1 024 pixels × 768 pixels). Comme nous l'avons vu précédemment, il existe des méthodes qui permettent d'améliorer la transmission de ces valves et de diminuer les pertes. Elles consistent à coller une matrice de microlentilles sur la valve. En focalisant le faisceau dans chacun des pixels, la transmission est améliorée d'environ 50 %. Cependant, le coût de la valve augmente en conséquence, ce qui restreint l'usage de cette technique à des applications professionnelles.

Dans le cadre de valves réflectives (LCOS, DMD), grâce aux fines règles de dessin qu'offrent les technologies CMOS (0,5 à 0,35 µm) et à la possibilité unique des valves réflectives de cacher le transistor sous un pixel, les pertes de géométrie sont minimes (de 5 à 10 %).

**Pertes dues à la polarisation et à la modulation** : elles proviennent essentiellement des pertes dans le polariseur et l'analyseur. En effet, même si le faisceau incident est prépolarisé à environ 90 %, ces composants introduisent des pertes globales de l'ordre de 30 %.

Les autres effets de modulation qui peuvent introduire des pertes sont d'une part les coefficients de transmission des couches successives formant la structure de la valve. Elles sont d'environ 10 à 15 %. D'autre part, dans le cas d'un projecteur monovalve LCOS, le modulateur électro-optique ne peut parfois répondre suffisamment rapidement pendant la sous-trame d'affichage. Le temps mort introduit une perte de flux qui peut atteindre 30 %. Pour résumer, disons que les pertes par modulation s'élèvent à environ 40 % dans le meilleurs des cas.

### 5.4 Formation d'image et cabinet de rétroprojection

Cette partie concerne le système qui assure le grandissement et le repliement du faisceau dans le cabinet de rétroprojection. Ici, l'efficacité lumineuse est essentiellement rognée par les pertes de transmission des différents éléments de l'objectif de projection (10 %) et par les pertes de réflexion des miroirs (8 %), ce qui fait une perte globale de 18 %. Notons que l'objectif de projection, et notamment son ouverture, est calculé pour laisser passer le flux lumineux avec un minimum de vignettage.

## 5.5 Conclusion

Les pertes totales du système peuvent atteindre plus de 90 % par rapport au flux en sortie de lampe. Cette transmission faible (10 %) s'exprime parfois sous une autre forme appelée efficacité. Elle correspond en fait au flux en sortie du projecteur divisé par la puissance électrique de la lampe ; elle est exprimée en lumens par watt (lm/W).

Les valeurs numériques les plus courantes, aujourd'hui, sont de 5 lm/W pour les applications TV où les spécifications de colorimétrie sont très contraignantes et de 10 à 15 lm/W pour les projecteurs frontaux graphiques pour lesquels les critères de colorimétrie sont moins importants. De plus, l'efficacité est d'autant plus grande que ces derniers projecteurs ont l'opportunité d'utiliser des lampes UHP à arcs courts (1 mm), dont les durées de vie (2 000 h) ne sont pas, pour le moment, compatibles avec le marché grand public.

## 6. Autres techniques de projection

### 6.1 Projecteurs ILA

Le projecteur ILA (*image light amplifier*) est le fruit de la collaboration entre JVC et Hughes Aircraft. La technologie ILA sépare la partie génération d'image de la partie éclairement qui fournit la source de l'amplification. Pour la génération d'image, on utilise un tube cathodique dont l'image est transférée sur le dispositif électro-optique constitué d'un écran réfléctif à cristaux liquides sans matrice d'adressage mais qui dispose d'une couche d'éléments photosensibles agissant comme des résistances variables, qui vont moduler la tension localement sur le cristal liquide en fonction du niveau lumineux reçu du CRT. Ce dispositif, qui fonctionne en réflexion, reçoit donc en chaque point une commande sous forme de signal lumineux d'ouverture ou de fermeture du pixel. Une puissante lampe au xénon éclaire à travers un séparateur de faisceau le dispositif électro-optique. Les projecteurs ILA sont utilisés dans les grandes salles de type auditorium, où un flux de 12 000 lm est nécessaire. La réussite rencontrée par ces projecteurs provient de la performance du modulateur réfléctif très sensible et qui peut s'adapter à des flux lumineux très intenses (lampes Xe de plus de 7 kW) sans avoir de problème de fuites électriques.

**Nota :** ces projecteurs ne doivent pas être confondus avec la nouvelle génération de projecteurs lancés par JVC qui sont les D-ILA, où le modulateur est une valve LCOS classique telle que présentée au paragraphe 3.2.

### 6.2 Projecteurs laser

La projection laser présente un potentiel énorme, grâce à la possibilité d'avoir de hautes résolutions spatiales et de hautes luminances pour des écrans de grande taille.

La source laser balaye l'écran à très grande vitesse et génère une image de très haute qualité. Elle peut soit se passer de modulateur spatial en utilisant uniquement des procédés de balayage à miroir combiné à un dispositif de modulation du faisceau, soit éclairer directement un modulateur spatial avec une très grande efficacité.

L'avantage des sources laser pour l'architecture d'un système de projection est indéniable. Tout d'abord, le faisceau laser est par essence collimaté et présente donc une étendue minimale. Cela implique donc l'utilisation d'optiques de faible diamètre et de faible

ouverture. D'autre part, étant donné le caractère monochromatique des raies laser, les couleurs primaires sont saturées et offrent donc une reproduction colorimétrique de très bonne qualité.

L'inconvénient de cette technique est aujourd'hui d'une part la difficulté de trouver des sources laser adaptées, de longue durée de vie et de faible coût, et d'autre part, la génération de granularité, ou *speckle*, dans les images projetées (§ 3.3.1).

La génération de sources laser – rouge, verte et bleue – a été jusqu'à maintenant réalisée à l'aide de lasers à gaz ou de lasers solides utilisés en combinaison avec un matériau non linéaire pour faire du doublage de fréquence à partir d'une source infrarouge afin de générer les sources bleues et vertes. Le laser YAG doublé délivre ainsi la raie de 534 nm pour le vert. Pour le rouge, des diodes laser pulsées allant de 625 à 652 nm existent à l'état de prototype. Pour le bleu, il est plus difficile d'obtenir des puissances importantes actuellement. La recherche dans ce domaine est cependant très active à cause de la demande pressante de diodes bleues à l'état solide pour le stockage et la lecture optique.

Ainsi, des efforts récents sur les lasers solides [3] ont montré qu'il est possible de générer les trois sources à l'état solide, mais pour le moment avec des rendements quantiques très faibles.

Pour obtenir par exemple 150 lm avec une colorimétrie standard TV (EBU), si on choisit les longueurs d'onde rouge, verte et bleue, respectivement à 625, 534 et 442 nm, il faudra environ 150 mW (optique) de rouge, 180 mW de vert et 110 mW de bleu [4]. La difficulté se trouve alors dans l'obtention d'une source bleue.

Schneider Laser Technologies AG a publié ses recherches dans ce domaine [5]. Ils ont construit un système de projection à base de laser qui n'est évidemment pas compatible avec une application grand public ( $0,75 \text{ m}^3$ , 180 kg et 3 kW). Ce système est d'ailleurs dédié aux grands écrans et délivre un flux de plus de 20 W optiques.

## 6.3 Talaria et Eldophore

Parmi les systèmes optiques de projection utilisant le principe de la diffraction, on peut citer le Talaria et l'Eidophore, dans lesquels le modulateur électro-optique est un film d'huile sur un miroir sphérique tournant. Le Talaria est un ancien système très encombrant et lourd, qui est maintenant devenu obsolète devant les systèmes de projection ILA de Hughes et DLP de Texas Instruments (§ 4). Cependant, ce système a eu le mérite d'exister et d'avoir des performances remarquables.

## 7. Conclusion

Comme nous avons pu le voir, il existe une grande variété de systèmes de projection différents, chacun d'eux ayant des domaines d'application privilégiés. Aujourd'hui, la projection frontale à base de tubes a totalement disparu au profit de nouvelles technologies telles que les LCD et le DLP. De la même façon, la rétroprojection à base de *microdisplays* est en train de supplanter les systèmes à tubes.

# Affichage. Visualisation

## Projection et rétroprojection

par **Thierry BOREL**

*Ingénieur de l'École supérieure d'électronique de l'Ouest  
Responsable des laboratoires de recherche Displays, Electronics and Tests et Signal Processing  
Thomson R&D France, division Corporate Research*

et **Khaled SARAYEDDINE**

*Ingénieur de l'École supérieure d'ingénieurs en électronique et électrotechnique  
Docteur en optique de l'université de Franche-Comté  
Responsable des études optiques au sein du pôle Displays  
Thomson R&D France, division Corporate Research*

### Références

- [1] JEPSEN (M.L.) et coll. – *0.9 inch SXGA LCOS Panel with 450 Hz field rate*. Microdisplay 2001, article 4.11, MDC.
- [2] SHIMIZU (J.). – *Scrolling color LCOS for HDTV Rear Projection*. SID 01 Digest, 32, 1072-1075, Philips Research (2001).
- [3] NAKAMURA (S.) et coll. – *Room-Temperature continuous-wave operation of InGaN multi quantum-well -structure laser diodes with a long life time*. Appl. Phys. Lett., 70, 868-870 (1999).

- [4] JOUBERT (C.), HUIGNARD (JP.) et LOISEAUX (B.). – Publication interne, Thomson CSF LCR (2001).
- [5] HOLLEMAN et coll. – Proc. SPIE, 3954, 140-151, Projection Displays (2000).

### Autres

- STUPP (E.) et BRENNESHOLTZ (M.). – *Projection Displays*. John Wiley (1998).
- SHIKAMA (S.) et coll. – *Optical System of Ultra-Thin Rear Projector*. SID 02 Digest, 33, 1250-1253, Mitsubishi Electric Corp (2002).

### Dans les Techniques de l'Ingénieur

- DOYEUX (H.). – *Affichage. Visualisation. Écrans à plasma. Physique. Fabrication*. [R 610], Mesures et tests électroniques (2005).
- ZORZAN (P.). – *Affichage. Visualisation. Écrans à plasma. Signaux de commande*. [R 612], Mesures et tests électroniques (2005).
- WEITBRUCH (S.). – *Affichage. Visualisation. Écrans à plasma. Rendu d'images vidéo*. [R 614], Mesures et tests électroniques (2005).
- FERY (C.) et LE ROY (P.). – *Affichage. Visualisation. Écrans OLED*. [R 620], Mesures et tests électroniques (2005).

## Normalisation

EBU Tech. 3213 8-78	EBU Standard for Chromaticity Tolerances for Studio Monitors	ITU-R BT.709-3 2-98	Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange
SMPTE 274-M 2005	Television – 1920 × 1080 Image Sample Structure, Digital Representation and Digital Timing Reference Sequences for Multiple Picture Rates		

## Constructeurs

(liste non exhaustive)

Ces listes ne sont pas exhaustives.

### Tubes de projection

#### Hitachi

<http://www.hitachi.fr>

#### Panasonic

<http://www.panasonic.com>

#### Toshiba

<http://www.toshiba.fr>

#### Sony

<http://www.sony.fr>

#### Thomson

<http://www.thomson.fr>

#### Lampes à arc

##### Philips Lighting

<http://www.lighting.philips.com>

##### DLP

<http://www.dlp.com>

##### Osram

<http://www.osram.com>

#### 1-LCOS

##### MicroDisplay Corp.

<http://www.microdisplay.com>

#### Valves de projecteur LCD

##### Sony

<http://www.sony.fr>

**AFFICHAGE. VISUALISATION**

**Epson**  
<http://www.epson.com>

**Thomson**  
<http://www.thomson.fr>

**Thales LCD**  
<http://www.thalesgroup.com>

**3-LCOS**

**Sony**  
<http://www.sony.net> (voir SXRD)

**JVC**  
<http://www.jvc-victor.co.jp/english/pro/dila/index-e.html>

**Projecteurs à valves réflectives**

**Texas Instruments**  
<http://www.ti.com>

**DMD**

**Mitsubishi**  
<http://www.mitsubishi.com>

**Panasonic**  
<http://www.panasonic.com>

**Hitachi**  
<http://www.hitachi.fr>

**Samsung**  
<http://www.samsung.com/fr>

**GLV**

**Silicon Light Machines**  
<http://www.siliconlight.com>

**Sony**  
<http://www.sony.fr>

**Christies**  
<http://www.christiedigital.com>

## Organismes

**Commission internationale de l'éclairage (CIE)**

<http://www.cie.co.at>

**Union européenne de radio-télévision – European Broadcasting Union (EBU-UER)**

<http://www.ebu.ch>

**Society of motion picture and television engineers (SMPTE)**

<http://www.smpte.org>

**International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector (ITU-R)**

<http://www.itu.int/ITU-R>

# GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre, leurs compléments et mises à jour,** et bénéficiez des **services inclus.**



- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- |   |   |
|---|---|
| <input type="radio"/> Automatique - Robotique         | <input type="radio"/> Innovation                    |
| <input type="radio"/> Biomédical - Pharma             | <input type="radio"/> Matériaux                     |
| <input type="radio"/> Construction et travaux publics | <input type="radio"/> Mécanique                     |
| <input type="radio"/> Électronique - Photonique       | <input type="radio"/> Mesures - Analyses            |
| <input type="radio"/> Énergies                        | <input type="radio"/> Procédés chimie - Bio - Agro  |
| <input type="radio"/> Environnement - Sécurité        | <input type="radio"/> Sciences fondamentales        |
| <input type="radio"/> Génie industriel                | <input type="radio"/> Technologies de l'information |
| <input type="radio"/> Ingénierie des transports       |   |

Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,  
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)

# LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



## Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



## Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



## Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



## Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



## Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



## Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



## Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



## Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



## Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

\*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

## ILS NOUS FONT CONFIANCE



[www.techniques-ingénieur.fr](http://www.techniques-ingénieur.fr)

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)