

Technologies d’affichage digitales

Jean-Baptiste Thomas

Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Palais du Louvres, Paris

ABSTRACT

Ce document explicite les différentes technologies d’affichagees. Il donne des informations techniques considérant la reproduction de la couleur et les technologies sous jacentes présentes derrière l’écran. Dans technologies d’affichagees, nous incluons ce qui se trouve derrière le terme anglais *display device*. Nous présentons les principales technologies digitales utilisées pour afficher une image couleur. Nous ne traitons pas de l’impression. Ce document est majoritairement extrait d’une annexe de ma thèse de doctorat *Colorimetric characterization of displays and multi-display systems*.

Keywords: Technologies d’affichage digitales, reproduction de la couleur.

Contents

1	Préface	4
2	Introduction	4
2.1	Dispositif d'affichage (Display device)	4
2.2	Caractéristiques	5
2.3	Reproduction de la couleur	5
2.4	Types de dispositifs d'affichage	6
2.5	Génération de l'image	6
3	Technologies et systèmes d'aujourd'hui	6
3.1	Moniteurs	7
3.1.1	Moniteurs à Tube Cathodique - Cathod Ray Tube (CRT)	7
3.1.2	Moniteurs à Cristaux Liquides - Liquid crystal display (LCD)	9
3.1.3	Plasma Display Panel (PDP)	14
3.1.4	Technologie basée sur les DEL - LED	15
3.2	Vidéo-projecteurs	18
3.2.1	Projecteur analogique de cinéma	18
3.2.2	Vidéo-projecteurs CRT	18
3.2.3	Vidéo-projecteurs lasers	18
3.2.4	Principe des dispositifs de projection basés sur la modulation de la lumière - light valve modulation	19
3.2.5	Vidéo-projecteurs LCD	19
3.2.6	Digital Light Processing (DLP)	20
3.2.7	Liquid Crystals on Silicon (LCoS)	22
3.2.8	systèmes multi-moniteurs et multi-projecteurs	22
3.3	Dispositifs 3D	23

3.3.1	Holographie	23
3.3.2	Stéréoscopie	23
3.3.3	Heliodisplay	24
4	Voir un peu plus loin...	24
5	Modification de la couleur et effet boîte noire sur la caractérisation colorimétrique	26
6	Conclusion	26

1. PRÉFACE

Ce document est originellement basé sur un cours donné au sein du Master Media Technology du Gjøvik University College. Il a évolué au fil du temps, a été complété grâce à des apports divers. Les sources sont nombreuses, et viennent principalement du web, de discussions, de présentations et d'articles scientifiques. Si vous estimez qu'une partie du contenu n'a pas la citation qu'elle mérite, n'hésitez pas à contacter l'auteur qui se fera un plaisir de l'ajouter. Ce qui suit n'a pas la prétention d'être exhaustif, en particulier parce que le marché des dispositifs d'affichages (e.g. moniteurs, vidéo-projecteurs) évolue particulièrement vite. Cependant, nous espérons que ce document va aider le lecteur à comprendre le challenge sous-jacent à la problématique de la reproduction de la couleur via la compréhension technique de ce qui se passe de l'autre côté de l'écran.

2. INTRODUCTION

2.1 Dispositif d'affichage (Display device)

Pour commencer avec la notion de dispositifs d'affichages, nous avons pris quatre définitions au hasard, issues de différents points de vue:

- Un dispositif d'affichage est un appareil permettant la représentation visuelle ou tactile d'images acquises, stockées et transmises sous des formes variées. Dans cette catégorie nous pouvons mettre les média analogiques, digitaux électroniques ou mécaniques, dispositifs braille, indicateurs lumineux...
- Un dispositif d'affichage est une interface de sortie entre l'ordinateur et l'humain qui montre une image. De manière usuelle, le dispositif d'affichage inclut l'écran ou la surface de projection et le mécanisme qui projette l'information sur celui-ci.
- Un dispositif d'affichage est un moniteur CRT, panneau LCD, plasma, aerial imaging, vidéo-projecteur ou tout autre appareil électronique situé à la fin d'un système (digital, couleur...) et présentant un contenu.
- Un dispositif d'affichage électronique est un appareil ou système qui convertit un signal électronique représentant un contenu vidéo, graphique ou textuel en une image de cette information interprétable par un observateur.

Quelque soit la définition, il y a l'idée commune de visualiser ou présenter une information exploitable par l'observateur via un médium. Ce médium permet de convertir l'information originale (non exploitable) en une information exploitable.

Nous limitons ce travail à l'étude des technologies d'affichage digitales couleurs, i.e. l'information originale en entrée est un jeu de valeurs digitales, et la sortie est un arrangement spatial de couleurs.

Au sein d'un tel système l'information peut prendre différentes formes et être altérée par différents facteurs. L'information originelle peut-être une scène naturelle, une valeur digitale donnée par une caméra, des valeurs Adobe RGB, etc. Au sein de l'appareil aussi, l'information change de nature. Par exemple, la valeur digitale doit souvent être convertie en signal analogique à l'entrée de l'appareil (ceci est moins vrai avec les technologies LCD, Plasma ou OLED prenant en charge les standards DVI ou HDMI), en signal électrique, électrostatique ou électromagnétique... En sortant de l'appareil, l'information peut-être modifiée en fonction de l'environnement, de la position de l'observateur, etc.

2.2 Caractéristiques

Nous pouvons dresser une liste des caractéristiques importantes d'un dispositif d'affichage.

Pour un utilisateur *normal*, les informations importantes peuvent être: La puissance lumineuse (brightness), le contraste (blanc/noir), la taille de l'aire active (diagonale), dot pitch (la distance entre le centre de deux pixels adjacents), la résolution ou mieux, la résolution native (taille horizontale et verticale exprimée en pixels -aucun sens pour un CRT-), temps de réponse (temps nécessaire à un pixel pour changer d'état, de couleur, d'intensité), la constance par rapport à l'angle de vue, aspect ratio (4:3, 16:9, 16:10).

Un utilisateur avancé pourra être intéressé par des informations complémentaires telles que: Les propriétés d'additivité (est-ce que la couleur reproduite est bien la somme des primaires prises indépendamment?), la taille et la forme du gamut (le terme gamut est utilisé pour définir l'ensemble fini des couleurs qu'un dispositif d'affichage donné est capable de reproduire, et de manière usuelle, le volume couvert par ces couleurs dans un espace colorimétrique), la courbe de réponse en intensité (la relation entre l'entrée -puissance électrique ou information digitale- et l'intensité de la lumière produite, une fonction puissance est souvent utilisée par défaut -gamma-), le niveau de noir (La quantité de lumière émise lorsque l'entrée est nulle), la constance des primaires en chromaticité (la chromaticité des primaires est-elle constante lorsque l'on fait varier l'intensité?), la facilité de calibration (est-il facile de régler la luminance, le contraste, le point blanc? Pouvons nous introduire une LUT facilement), la facilité de caractérisation (relation entre l'entrée digitale *RGB* et la couleur reproduite)...

2.3 Reproduction de la couleur

La plupart des dispositifs d'affichages sont basés sur une mixture additive de couleurs de base (primaires). Ceci veut dire qu'une couleur C est le résultat de la combinaison linéaire (somme pondérée) de N primaires, P_1, P_2, \dots, P_N , tel que dans l'Equation 1:

$$C = \alpha_1.P_1 + \alpha_2.P_2 + \alpha_3.P_3 + \alpha_4.P_4 + \dots + \alpha_N.P_N \quad (1)$$

Dans la plupart des cas, il y a 3 primaires *, dont les longueurs d'ondes dominantes sont dans le rouge, le vert et le bleu (Primaires RGB pour Red Green et Blue). L'Equation 1 peut donc devenir l'Equation 2:

$$C = \alpha_1.R + \alpha_2.G + \alpha_3.B \quad (2)$$

2.4 Types de dispositifs d'affichage

Nous pouvons séparer ces dispositifs en trois grandes catégories:

- dispositifs d'affichage virtuels (Virtual displays) forment l'image de telle manière à ce qu'elle soit directement projetée sur la rétine. Ce sont des dispositifs à usage personnel, souvent sous la forme de lunettes actives.
- Dispositifs à vue directe (Direct view displays) produisent l'image sur une surface que l'on regarde. Ils sont généralement destinés à un usage personnel ou à un petit nombre d'observateurs (moniteurs).
- Les vidéo-projecteurs (Projection displays) créent l'image sur une surface auxiliaire physiquement séparée du dispositifs qui génère cette image. Ils sont bien adapté à un usage multi-utilisateurs.

2.5 Génération de l'image

Nous pouvons distinguer deux systèmes pour générer une image. Le dispositif d'affichage peut être émissif, tel que dans les technologies CRT, OLED, laser ou plasma. Il peut aussi être basé sur un dispositif de modulation de la lumière (light modulating device) tel que dans les technologies LCD, LCoS ou les dispositifs micro-electroniques (DLP).

Un système de projection peut être à projection arrière (rear projection), tel que le dispositif de projection soit positionné de l'autre coté d'un écran en transmittance par rapport à l'observateur. Il peut aussi être à projection de face (front projection), tel que le dispositif et l'observateur soient situés du même coté d'un écran en reflectance.

3. TECHNOLOGIES ET SYSTÈMES D'AUJOURD'HUI

Parmis les technologies présentées ci-apres, nous comptons CRT, LCD, Plasma, LED, LCOS, TMOS, Laser, DLP, Stéréo-vision, etc.

*Bien que les cas présentant une quatrième primaires -souvent à dominante jaune- pour augmenter la taille du gamut, voir plus ou une primaire *blanche* pour augmenter la luminance soient de plus en plus courants.

3.1 Moniteurs

Nous explicitons les principales technologies présentes dans les moniteurs.

3.1.1 Moniteurs à Tube Cathodique - Cathod Ray Tube (CRT)

Cette technologie existe depuis 1879 et est probablement encore la plus connue et la mieux comprise par les utilisateurs et les scientifiques. Des électrons sont émis par un canon à électrons, qui vont aller s'écraser sur un matériel phosphorescent qui va transformer cette énergie en lumière.

Détails technologiques Les électrons partent de la cathode, et prennent de la vitesse grâce à la différence de potentiel créée par le courant appliqué sur l'anode. Les faisceaux d'électrons sont contrôlés (déviés, focalisés) par l'application d'un champ magnétique ou électrostatique. L'anode est recouverte par un matériel phosphorescent (e.g. terre rare). Quand le faisceau d'électrons arrive sur l'anode, son énergie est transmise au matériel phosphorescent qui la transforme en lumière. Les propriétés du matériel décident du spectre de la lumière émise (sa couleur). La dernière pièce est un écran métallique perforé (shadow mask) aligné de telle manière que seuls les points rouges puissent être touchés par le faisceau dédié au rouge (de même pour le vert et le bleu). En contrôlant l'intensité des faisceaux, la couleur voulue est émise. Le mélange des primaires est basé sur les propriétés d'assimilation spatiale de l'oeil humain, voir Figure 1.

Image et couleur A l'origine, le canon à électrons traçait uniquement une ligne entre deux points (vecteur); Il n'y avait donc pas d'effet d'aliasing ou de pixelisation. Cependant ce système ne permettait que de tracer des contours. Après évolution, le canon décrit la totalité de l'écran suivant un chemin prédéfini invariant. En faisant varier l'intensité appliquée au cours du temps en fonction de la position du canon, une image est créée grâce aux propriétés d'assimilation temporelle du système visuel humain. Pour réduire l'effet de flicker (papillotement), qui peut apparaître avec ce genre de dispositif, il est commun d'entrelacer deux images (reproduire une image en deux fois avec une résolution diminuée de moitié pour chacune des sous-images). la première image décrit par les lignes paires et la deuxième les lignes impaires.

L'information est contrôlée par la puissance appliquée à chaque canon (R,G,B) et les propriétés des phosphores. Il est important de dire que la relation entre la puissance électrique appliquée au canon et la lumière émise n'est pas linéaire, mais suit une fonction puissance (γ).

Avantages et inconvénients Les avantages incluent le bas coût de production (technologie bien établie), la fidélité des couleurs (technologie bien connue et bien contrôlée), les modules de gestion des couleurs ont été définis

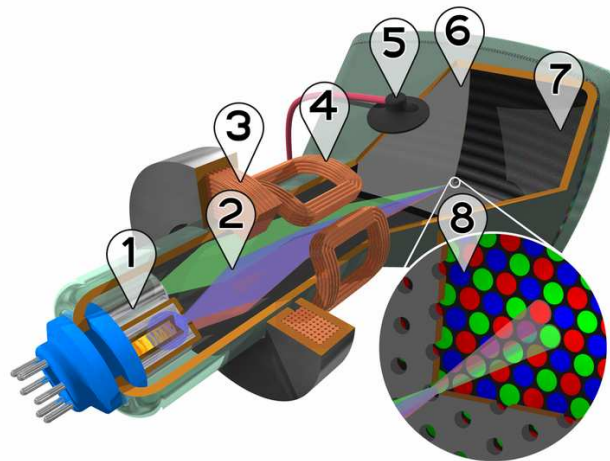


Figure 1. Illustration des détails de la technologie CRT. 1-Canon à électrons. 2-Faisceau d'électrons. 3-Bobines de focalisation. 4-Bobines de déviation. 5-Connection de l'anode. 6-Masque de séparation des faisceaux. 7 et 8-Couche de phosphores sur la face interne de l'écran. Source http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9b/CRT_color_enhanced.png/750px-CRT_color_enhanced.png.

pour cette technologie (le fameux gamma), la taille du gamut. Cette technologie permet de reproduire un très bon noir, montre une bonne qualité à n'importe quelle résolution, a un très bon temps de réponse comparé aux LCDs, donc une meilleure fréquence d'actualisation, et donc reproduit mieux les vidéos (sauf contenu spécifique). L'angle de vue n'est pas un paramètre critique en terme de perception des couleurs.

Cependant, lorsque trop de puissance est appliquée au panneau phosphorescent, il y a un problème de netteté. Cela vient de la mauvaise collimation des faisceaux d'électrons qui peuvent illuminer le(s) sous-pixel(s) adjacent(s). Cette technologie est connue pour l'émission de radiation, sa grosse taille, son poids élevé. Elle consomme aussi beaucoup d'énergie et dégage de la chaleur.

Au niveau de la fréquence d'actualisation, un compromis doit être trouvé. Un temps d'actualisation faible crée un effet de flicker (papillonnement) due à la désactivation des phosphores entre deux passages du faisceau d'électrons. À l'inverse, une forte fréquence d'actualisation donne une moins bonne netteté à cause de la sur-excitation des phosphores.

Bien que cette technologie soit de moins en moins produite, elle reste l'une des meilleures en terme de rendu couleur. Cependant, les technologies basées sur des DEL (diodes électro-luminescentes) vont probablement dépasser et enterrer définitivement les CRTs en terme de qualité.

3.1.2 Moniteurs à Cristaux Liquides - Liquid crystal display (LCD)

C'est la technologie qui a remplacé les CRTs sur le marché des consommateurs usuels. Elle a commencée son ascension depuis les années quatre-vingt. Un rétro-éclairage (backlight) est utilisé comme source de lumière, et des filtres basés sur les cristaux liquides permettent de contrôler la quantité de lumière qui est émise.

Détails technologiques Deux polariseurs dont les polarisations montrent un angle de 90° (dans la plupart des cas) sont placés de part et d'autre d'un *sandwich* composé de deux couches de verre. Ces couches de verre englobent des cristaux liquides en état nématique (entre le cristal solide et le cristal liquide). Les molécules sont distribuées sans ordre fort particulier, mais en moyenne parallèles, i.e. orienté selon une direction donnée comme dans un cristal solide. Autour du cristal des couches de polymères tiennent les molécules quand aucune puissance électrique n'est appliquée, et jouent le rôle d'électrodes. Le panneau est dit passif (il n'émet aucune lumière).

La lumière vient du rétro-éclairage; elle est polarisée par le premier filtre polarisant (si il n'y a pas de cristal, la lumière est bloquée par le deuxième polariseur). Quand aucune puissance n'est appliquée, l'orientation des molécules des cristaux est donné par l'alignement avec la surface des couches de polymères. Dans le cas des *twisted nematic* (arrangement hélicoïdale), les cristaux liquides au repos changent la polarisation de la lumière de 90° (le panneau semble transparent). Le changement de polarisation vient des propriétés de biréfringence des cristaux liquides. Quand une puissance est appliquée, un champ magnétique est créé et va modifier l'orientation des molécules. Dans le cas des *twisted nematic* ce champ va forcer les molécules à être alignées. Dans ce cas, la polarisation de la lumière ne sera pas changée, et la lumière ne sera pas dans le bon état de polarisation pour passer le second polariseur. Il faut noter aussi que l'usage de lumière polarisée induit une perte d'énergie au passage du premier polariseur puisque seule la lumière dans le bon état de polarisation pourra passer cette barrière.

Couleur et image Le panneau à cristaux liquides est originellement un dispositif d'affichage en niveau de gris, i.e. il laisse passer plus ou moins de lumière selon l'orientation des molécules. La couleur vient de l'utilisation de filtres sur les sous-pixels (assimilation spatiale).

L'ensemble des couleurs possibles est limité par les propriétés spectrales de l'éclairage arrière et des filtres colorés utilisés. Au départ, seulement 6³ couleurs pouvaient être effectivement produites au lieu de 8³ pour un appareil 8 bits à cause du mauvais contrôle de l'orientation des cristaux. Ce problème est dépassé aujourd'hui (bien, que certains moniteurs, bas cout ou basse consommation, montrent encore ce type de limitation).

Il est important de dire que la relation entre la puissance électrique appliquée et la lumière émise n'est pas linéaire, ne suit pas un gamma non plus, mais peut-être modélisé par une fonction de la forme d'une sigmoïde (S-curve).

Lorsque le moniteur n'est pas utilisé à sa résolution native, un effet d'aliasing peut apparaître. L'aliasing correspond à la modification qu'un signal continu peut subir lorsqu'il est échantillonné et reconstruit avec un trop petit nombre d'échantillon (voir Figure 2).

Lorsque nous augmentons la résolution d'une dalle LCD, nous diminuons sa luminance. Sur la Figure 3, nous pouvons voir que le matériel utilisé pour fixer les cristaux liquides remplit de plus en plus la surface du panneau avec l'augmentation de la résolution. Plusieurs solutions peuvent être mise en oeuvre pour pallier à ce problème, par exemple, nous pouvons utiliser un film polarisé réfléchissant pour recycler la lumière existante dans un autre état de polarisation (ce qui augmente l'efficacité de 20-30%), ou augmenter le nombre ou la puissance des éclairages arrière.

Pour améliorer les possibilité de couleur et de rendu d'image d'un panneau LCD, il est possible d'utiliser la technologie lumileds (utiliser des DELs comme rétro-éclairage), d'utiliser une lampe wide color gamut cold cathode fluorescent comme rétro-éclairage au lieu d'une cold cathode fluorescent lampe normale (Ce qui augmente le gamut d'environ 28% mais qui est environ 30% moins efficace).

Les configurations *in-plane switching* et *vertically aligned mode* améliorent le temps de réponse, le contraste et l'invariance de l'angle de vue comparé à la configuration *twisted nematic*, cependant 50% de lumière en moins est transmise.

Si nous considérons qu'une image naturelle typique est constituée d'un mélange entre des couleurs riches extrêmement saturées qui sont rarement très brillantes et des couleurs extrêmement brillantes et non saturées telle que la réflexion spéculaire de la lumière sur des objets plus ou moins plats, il est possible de modifier le traditionnel sous pixel *RGB* en ajoutant un sous pixel *blanc*.¹ La Figure 4 illustre comment arranger des jeux de quatre sous pixels, la Figure 5 illustre la comparaison avec un système traditionnel *RGB*. Cette solution a été déjà implémentée dans de nombre dispositifs mobiles.

Principaux types de LCDs Les principaux types de LCDs:

- TN et DSTN (Twisted Nematic et Dual Scan TN). TN est la technologie de base, elle a un mauvais temps de réponse (les DSTN sont un peu meilleurs puisqu'ils font un double scan). Ce sont des matrices passives qui sont transparentes à l'état de repos.



[(a) Image échantillonnée correctement]



[(b) Effet de moiré cause

de l'aliasing]

Figure 2. Un exemple de l'effet d'aliasing. La première image (a) est échantillonnée correctement; La seconde (b) montre un effet de moiré du à une erreur de sampling. Source: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moire_pattern_of_bricks.jpg and http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moire_pattern_of_bricks_small.jpg.

- TFT (Thin Film Transistor). L'électrode est remplacée par une électrode et un film de transistors qui permet un meilleur contrôle de la tension appliquée. Ceci permet d'améliorer le temps de réponse ($\leq 10ms$). C'est une matrice active, elle ne laisse pas passer la lumière à l'état de repos (à cause de la couche de silice pour les transistors située à l'arrière).



Figure 3. Illustration de la variation de la luminance avec l'augmentation de la résolution. La surface couverte par le matériel utilisé pour maintenir les cristaux liquides rempli de plus en plus la surface du panneau lorsqu'on augmente la résolution.



Figure 4. Exemple d'arrangement de sous pixels dans un dispositif d'affichage LC basé sur 4 sous pixels RGBW. Source.¹

- IPS et S-IPS (In-Plane Switching) utilise des cristaux liquides parallèles à l'écran, produisant une meilleure invariance à l'angle de vue mais nécessite le double de transistors.
- MVA (Multi-Domain Vertical Alignment) et PVA (Patterned Vertical Alignment). Ces types de technologies possèdent différents domaines de réfraction par cellule, et donc un meilleur niveau de noir, un meilleur contraste et sont plus invariants à l'angle de vue.

Temps de latence et motion blur Le temps de latence ou temps de réponse désigne le temps qu'un pixel met pour changer d'état de son meilleur noir à son blanc le plus saturé et pour revenir au noir. Parfois le temps de latence est exprimé en temps de passage d'un niveau de gris à un autre niveau de gris. C'est une caractéristique importante des LCDs car leurs principaux défauts viennent d'une réponse trop lente. Entre deux images, les pixels n'ont pas le temps d'atteindre le niveau voulu, et le résultat est une image floue (ghost effect or motion blur). En appliquant plus de courant que nécessaire au début du changement d'état permet d'atteindre plus rapidement le niveau voulu. C'était un gros problème de la technologie au départ. Ce problème est contourné aujourd'hui au prix d'une baisse de la qualité du rendu coloré et de l'invariance à l'angle de vue.

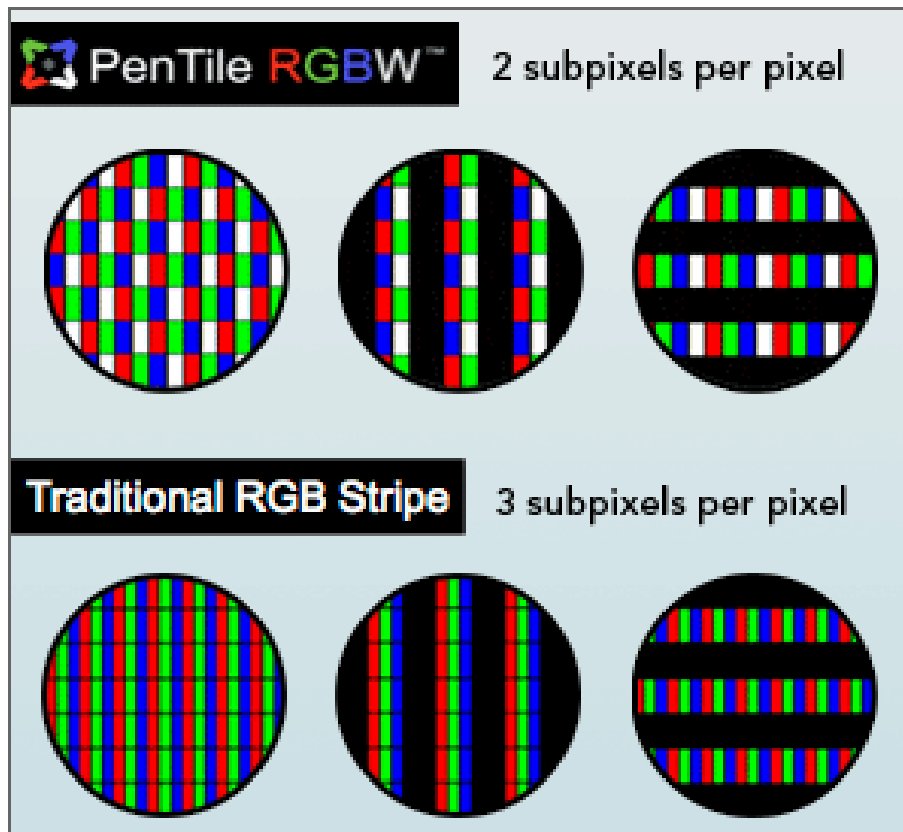


Figure 5. Exemple d'arrangement de sous pixels dans un dispositif d'affichage LC basé sur 4 sous pixels RGBW comparé avec une forme traditionnelle *RGB*. Notons que la structure montre la même limite de modulation-transfer-function. Source <http://www.clairvoyante.com/images/rgb-v-rgbw-circle-chart.png>.

Même si le temps de latence était nul, il y aurait quand même un effet de motion blur du à une transition dure entre deux images d'une vidéo (déplacement d'un objet d'un pixel à l'autre). Une solution à ce problème permet d'atteindre une *perfect motion*. Une image noire est insérée entre chaque image. Les images sont combinées avec ces images noires et le motion blur n'est plus perceptible car le système visuel s'adapte sur le noir à chaque image.

Avantages et inconvénients Leur design a été clairement l'avantage principal de cette technologie en face du CRT lorsqu'elle est apparue sur le marché (poids, volume). De plus, elle produit moins de flicker, est plus efficace en terme de consommation énergétique et peut produire plus de luminance.

Cependant cette technologie montre de gros inconvénients en terme de contraste (le cristal n'est pas capable de bloquer toute la lumière, donc le niveau de noir -offset- est important). la dépendance à l'angle de vue est importante et la couleur limitée par les propriétés du rétro-éclairage. De plus, un panneau LCD est défini pour

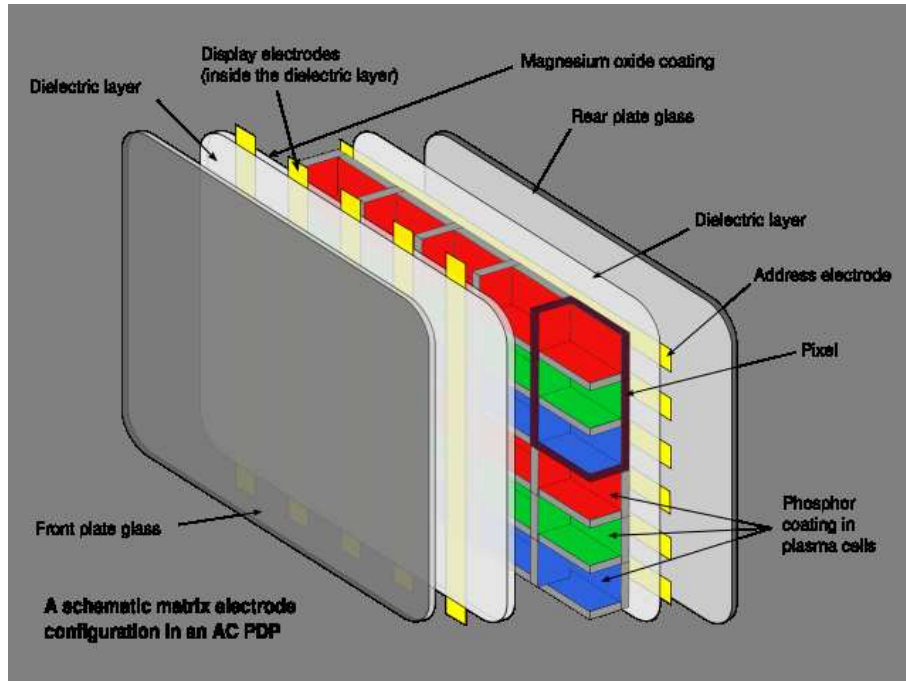


Figure 6. Technologie Plasma Display Panel. Source <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plasma-display-composition.svg>.

une résolution optimale donnée, lors du passage à une résolution non optimale, l'image peut devenir floue ou être déformée. Nous pouvons noter que le coût du rétro-éclairage représente environ 70% du coût du moniteur. En terme de couleur, une remarque importante est que la transmittance spectrale du cristal liquide varie avec l'orientation de ces cristaux. La conséquence est que les caractéristiques des primaires ne sont pas stables avec l'augmentation de l'intensité.

3.1.3 Plasma Display Panel (PDP)

Cette technologie existe depuis 1964.

Détails technologiques Cette technologie est basée sur les mêmes principes que les tubes fluorescents. Néon et/ou Xénon (gaz nobles) sont contenus dans de petites boîtes présentées en sandwich entre deux plaques de verre (Figure 6). Des électrodes sont aussi présentes entre les vitres. En créant une différence de potentiel, nous ionisons les gaz[†]. Les électrons libres se déplacent en direction de l'électrode et rentrent en contact avec elle. Leur énergie est transformée en photons. Afin de créer de la couleur, des phosphores recouvrent la surface, les photons UV émis par le plasma excitent les phosphores qui émettent une lumière dans le visible.

[†]Gaz ionisé: un ou plusieurs électrons libres présents) et créons du plasma, qui est conducteur

Avantages et inconvénients La taille d'une dalle n'a pas de limite pratique. Cette technologie montre un gros gamut grâce à l'utilisation des phosphores comme primaires. Elle est invariante à l'angle de vue, il n'y a pas de niveau de noir -offset- puisque c'est une technologie émissive.

Cependant, il est très cher de construire un tel système pour de super hautes résolutions (la taille des cellules devient trop petite). Le contrôle de la couleur est difficile, particulièrement parce que la couleur reproduite est dépendante du contenu de l'image. Cet effet arrive pour deux raisons: D'une part, le plasma réagit aux champs électro-magnétique de ses voisins, créant une forte interaction entre les pixels. D'autre part, l'énergie nécessaire varie énormément en fonction de l'image reproduite, pour pallier à ce problème, les constructeurs ont appliqué une contrainte concernant la quantité d'énergie disponible pour une image. La luminance atteignable est donc limitée pour les scènes très lumineuses. Des effets de fantômes peuvent aussi apparaître quand une cellule reste excitée même sans puissance appliquée. La durée de vie n'est pas très bonne, et la luminosité baisse avec l'âge de l'appareil.

3.1.4 Technologie basée sur les DEL - LED

Organic Light-Emitting Diode (OLED) (kodak, 1987), Light Emitting Polymer (LEP) (Cambridge, display tech), Organic Electro-Luminescence (OEL) sont des technologies basées sur des Diodes Electro-Luminescentes (DEL) (Light-Emitting Diode (LED)) dont le support électro-luminescent émissif est composé d'un film de composants organiques. Ce support contient généralement un pixel en polymère qui peut émettre de la lumière de différentes couleurs.

Détails technologiques Cette technologie est basée sur un matériel à l'état solide constitué de séries de fin films organiques (semi-conducteurs) coincés entre deux fin films d'électrodes déposés sur un support (See Figure 7). Quand un courant est appliqué, des charges sont injectés dans le semi-conducteur organique, la couleur créée dépend du matériel utilisé (elle peut-être rouge, verte, orange, jaune, vert émeraude, blue, mais aussi UV ou infra-rouge). Le support peut-être en presque n'importe quel matériel sur lequel on peut déposer un substrat, ce qui rend cette technologie très polyvalente. Les technologies utilisées pour déposer le substrat ou pour construire les électrodes peuvent être diverses, par exemple nanolithographie (électrodes), impression jet d'encre (sc organiques) déposition ou évaporation sous vide, ou déposition de matière organiques par évaporation.

Semi-conducteur Un semi conducteur présente une conductivité d'un type particulier, entre conducteur et isolant. Le courant électrique peut circuler dans un matériau grâce aux trous ou/et aux électrons. La propagation via les électrons est *normale* (les atomes échangent leurs électrons en trop à partir d'une zone négative vers une

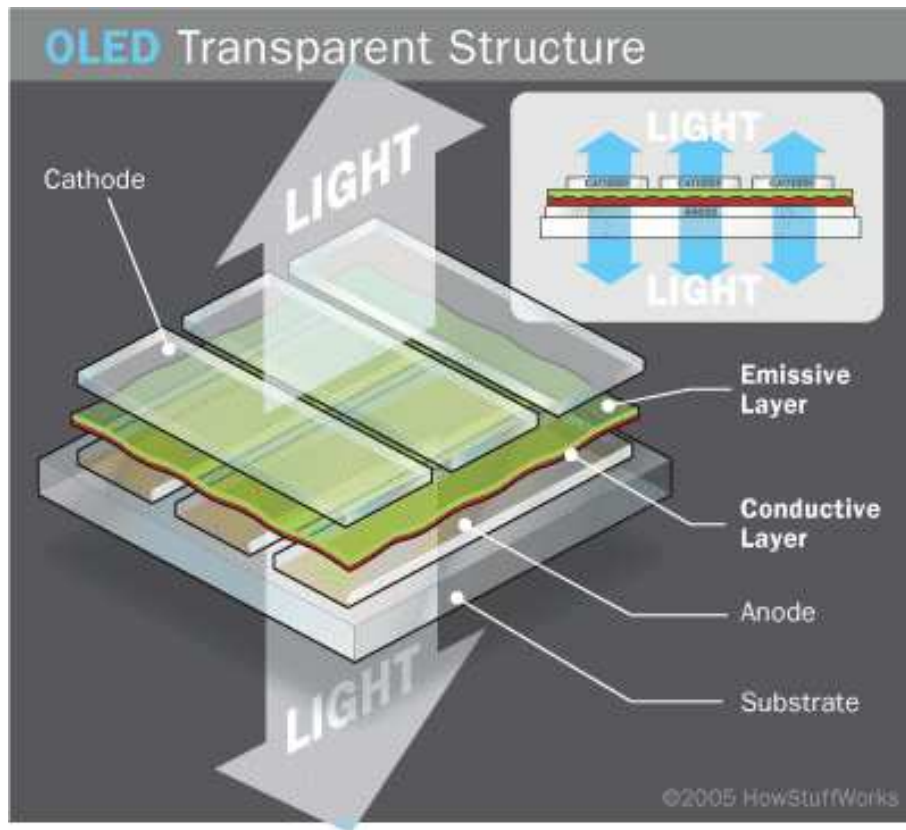


Figure 7. Principe OLED. Source <http://static.howstuffworks.com/gif/oled-transparent.gif>.

zone moins négative). La propagation par trous est différente. Les charges voyagent depuis une zone positive vers une zone moins positive car le mouvement est créé par le manque d'un électron dans une structure électrique quasi-pleine. En contrôlant le nombre de trous ou d'électrons, nous pouvons changer les caractéristiques des matériaux (on parle alors de dopage de matériaux). Un matériau qui a plus de trous est dit de type N, un autre avec plus d'électrons est dit de type P.

Une jonction P-N est une juxtaposition de matériaux de type N et P. Quand une tension positive est appliquée à la partie P, les trous sont poussés vers la jonction. Dans le même temps, dans la partie N, les électrons sont poussés vers la jonction. Quand ils arrivent et se rencontrent à la frontière, ils peuvent se combiner (électron/trou) et émettre un photon. Voir Figure 8.

Un semi-conducteur organique est basé sur le même procédé, excepté le fait que le matériel utilisé est différent (cristal ou polymère). Nous rappelons que le terme organique définit un matériau basé sur du carbone.

Types de dispositifs basé sur des DELs organiques Sur le principe des DELs organiques, plusieurs types de dispositifs peuvent être envisagés:

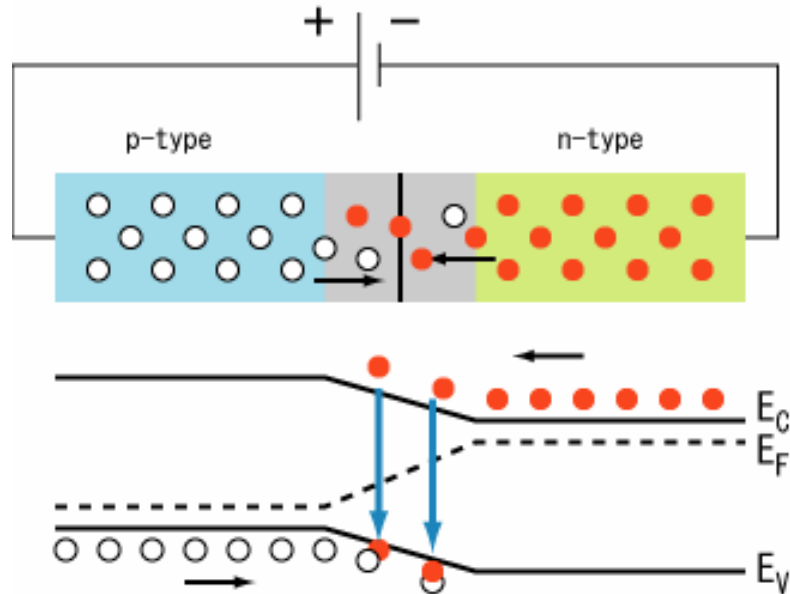


Figure 8. Jonction PN, illustration. Source <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:PnJunction-Diode-ForwardBias.PNG>.

- FOLED (Flexible Organic Light-Emitting Diode) définit une classe de dispositifs basée sur l'impression des DELs organiques sur un substrat flexible (plastique ou métal). De nombreuses applications peuvent être envisagées, mais ces substrats sont plus fragiles par rapport à des verres par exemple.
- PHOLED (Phosphorescent) Un matériel phosphorescent soluble est utilisé pour créer les DELs organiques au lieu du typique matériel fluorescent. L'avantage de ce type de dispositif est que 100% de l'énergie appliquée est convertie en lumière.
- TOLED (Transparent) utilise des électrodes et du matériel émissif transparent. Il est alors possible d'émettre de la lumière à partir de la face avant, de la face arrière ou des deux côtés. Un tel dispositif a typiquement 70% de transparence quand il n'est pas utilisé.
- SOLED (Stacked) améliore la qualité de la couleur et la résolution en collant des TOLEDs ensemble. En localisant les sous-pixels au même endroit, la notion d'assimilation spatiale n'est plus nécessaire, e.g. il y a jusqu'à 3 pixels à l'endroit où il y avait 3 sous-pixels.

Avantages et inconvénients Cette technologie consomme peu d'énergie. Elle a une bonne qualité de rendu des couleurs (wide gamut, bonnes propriétés des matériaux pour la modélisation), un bon contraste (émissif donc peu d'offset) et est bien invariante à l'angle de vue. Le système entier est fin, et peut-être flexible. Il est facile et peu coûteux à fabriquer.

Cependant son principal défaut est sa durée de vie (les PHOLEDs permet de la prolonger un peu en optimisant la quantité d'énergie utilisée). Un gros problème est sa sensibilité à l'humidité durant l'impression et le besoin de cloisonnement des matériaux organiques à l'intérieur d'un matériau annexe. Un autre gros frein à son développement est que la technologie est propriétaire (Eastman Kodak et autres).

3.2 Vidéo-projecteurs

Nous allons expliciter les principales technologies et concepts à la base de la vidéo-projection. Nous traiterons par exemple les CRT/Laser, LCD, DLP, LCoS, etc.

3.2.1 Projecteur analogique de cinéma

Bien que ce ne soit pas un appareil digital, nous allons dire un mot à ce sujet. Ces dispositifs sont basés sur la projection d'un positif de film imprim. Il y a donc un mélange entre une mixture additive et une mixture soustractive, et le gamut d'un couple film/projecteur ressemble plus à celui d'une imprimante qu'à celui d'un projecteur numérique. Ces appareils sont de plus en plus remplacés par leurs équivalents numériques.

Pour plus d'information sur les technologies d'affichages propres au cinéma, veuillez consulter le document qui en traite (cf bla bla).

3.2.2 Vidéo-projecteurs CRT

Ce système utilise un petit CRT de forte puissance pour générer l'image. Cette image est ensuite focalisée puis élargie à l'aide d'un système optique de lentilles situé en face du CRT. Une configuration typique se compose de 1 à 3 CRTs couplés avec 1 à 3 systèmes optiques. Ils ont les mêmes caractéristiques que les moniteurs CRTs, mais sont extrêmement difficiles à déplacer (souvent une salle leur est destinée et le système est monté sur place). Ils montrent une faible luminance, et sont plutôt chers.

3.2.3 Vidéo-projecteurs lasers

Ils sont similaire aux CRTs mais les phosphores (émettant une lumière incohérente non collimatée) sont remplacés par des lasers émettant une lumière cohérente et collimatée. Habituellement, chaque laser a son propre système optique, mais des solutions existent pour n'en utiliser qu'un seul sans recombinaison (comme les CRTs). Le principale avantage d'un tel système est qu'il peut être de très petite taille et qu'il produit une bonne intensité.

Nous pouvons noter l'apparition de pico projecteurs (Voir Figure 9) sur le marché ces trois dernières années. Ces dispositifs nécessitent la miniaturisation du dispositif d'imagerie. Ils peuvent être basés sur la technologie laser, mais aussi le principe DLP, utilisant des Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) ou sur du LCoS avec un rétro-éclairage DEL. Ils ont typiquement une luminosité d'environ 10 lumens.



Figure 9. Exemple d'utilisation de pico-projecteur. Source <http://www.macintom.com/wp/wp-content/gallery/2009-01/microvision-pico-projector.png>.

3.2.4 Principe des dispositifs de projection basés sur la modulation de la lumière - light valve modulation

La lumière est divisée en 3 (ou plus) composantes (RGB). Chaque composante est modulée indépendamment, puis elles sont recombinaées et projetées vers l'écran via un système optique. Nous pouvons faire la différence entre les dispositifs basés sur un, deux ou trois éléments de modulation.

- Un système à panneau unique utilise un unique modulateur de lumière pour contrôler les trois canaux (composition séquentielle de la couleur -DLP-, micro filtres, méthodes de séparation angulaire).
- Dans les systèmes à deux panneaux, un modulateur gère une des primaires, un autre prend en charge les deux autres primaires. Cette configuration permet un bon compromis lorsqu'un système est capable de gérer deux primaires mais pas trois. Par exemple, si la lampe du projecteur est déficiente dans certaines longueurs d'onde et qu'une primaire nécessite un plus long temps d'exposition que les deux autres pour atteindre un niveau d'intensité suffisant.
- Les systèmes à trois panneaux dédicacent un modulateur par canal (le cas de nombreux LCDs).

3.2.5 Vidéo-projecteurs LCD

Détails technologiques L'appareil de modulation est un panneau LCD en transmission. La lumière est séparée grâce à l'utilisation de miroirs dichroïques. L'information de chaque canal est modulée via ces panneaux.

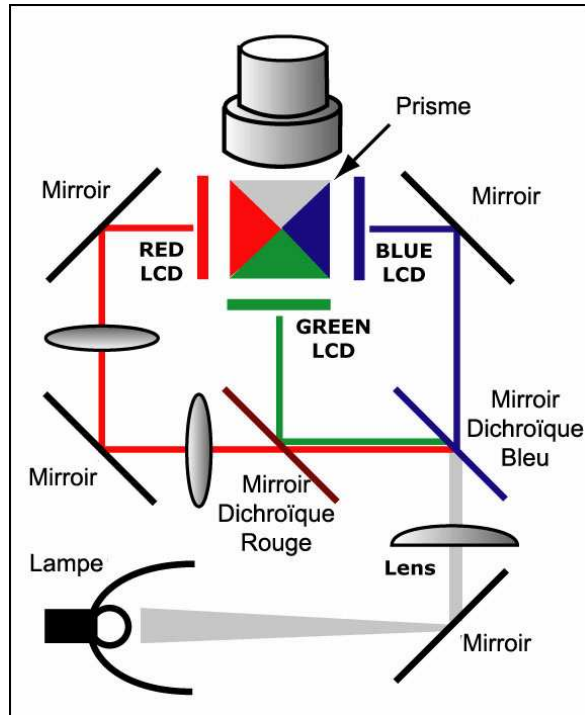


Figure 10. Tri-LCD projection system. From <http://gp32.free.fr/projo/LCD.jpg>.

La lumière est recombinaée via un prisme dichroïque et va être projetée sur l'écran en passant au travers d'un système optique, tel que montré sur la Figure 10.

Avantages et inconvénients Les vidéo-projecteurs à cristaux liquides ont une bonne saturation comparée avec un DLP qui aurait un segment de roue blanc. Ils donnent une image très nette à leur résolution native.

Cependant, le niveau de noir est élevé (ils montrent donc généralement un mauvais contraste). Ils montrent ce que l'on appelle le *screen door effect* (les lignes entre les pixels sont visibles), ainsi que de nombreuses sources de non-uniformités spatiales dues à l'alignement difficile des panneaux LC et des éléments optiques.

3.2.6 Digital Light Processing (DLP)

L'appareil de modulation est un Digital Micro-mirror Device (DMD). La lumière est séparée temporellement en plusieurs primaires en utilisant une roue à filtres colorés (La plupart du temps, mais les systèmes basés sur 3 DMDs couplés avec des miroirs dichroïques existent, particulièrement sur les systèmes destinés au cinéma numérique). Le DMD contient un micro-miroir pour un pixel. L'orientation de ce miroir détermine la quantité de lumière qui va passer par le système optique. Une configuration typique est montrée sur la Figure 11.

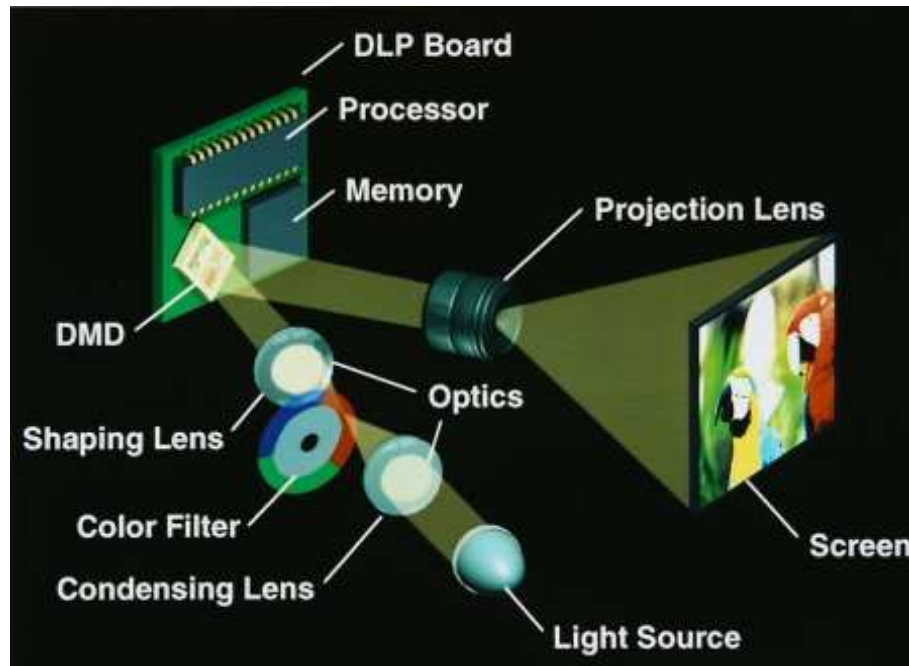


Figure 11. Principe du DLP. Source http://www.pctechguide.com/images/57DLP_1chip.jpg.

DMD La technologie DMD a été créée dans les années soixant-dix. En 1987, des chercheurs de TI ont posé des miroirs sur un chipset CMOS sous forme d'une matrice de miroirs microscopiques de taille 1280*1024. Chaque miroir peut pivoter sur $\pm 10 - 15^\circ$ comme un interrupteur (on-off). Quand le miroir est en état on, toute la lumière est transmise vers le système optique. Dans le cas de l'état off, la lumière est transmise vers un corps noir absorbant. Les différents niveaux d'intensités sont obtenus en alternant les deux états de manière séquentielle. Les miroirs sont contrôlés grâce à un champ électrostatique.

Color wheel Bien qu'il soit possible d'utiliser une solution comprenant un jeu de miroirs dichroïques et de prismes pour séparer puis recombinaer la lumière, l'utilisation de trois DMDs est souvent trop chère. Dans la plupart des cas nous nous trouvons dans la situation où un seul DMD est utilisé. Dans ce cas, la lumière est séparée temporellement à l'aide d'une roue à filtres colorés (Figure 12):

- Roue à filtres comprenant 3 filtres (RGB). Un effet d'arc en ciel, aussi connu sous le nom de color breaking peut apparaître.
- Roue à filtres comprenant 3+1 filtres (RGBW). Ce système permet d'augmenter la luminance, mais a tendance à désaturer les couleurs perçues.
- Roue à filtres comprenant 2*3 filtres (RGBRGB). Ce système aide à supprimer le color breaking en aug-

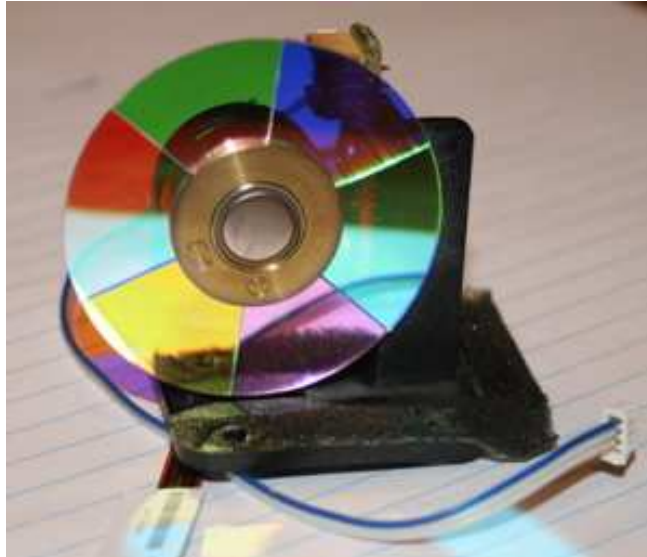


Figure 12. Une roue à filtre comprenant 6 primaires. Nous pouvons remarquer la taille et l'arrangement des différents segments est spécifique. Ceci permet de limiter l'effet de color breaking et d'utiliser au mieux chaque primaire. Source <http://www.jangro.com/images/samsung-dlp/samsung-color-wheel.jpg>.

mentant la fréquence de rafraîchissement.

- Roue à filtres comprenant N primaires (RGBCMY, RGBWCMY, RGBY, etc). Ces systèmes permettent d'augmenter la taille du gamut du dispositif.

Avantages et inconvénients Les avantages incluent un bon niveau de noir, des primaires bien constantes en chromaticité (les filtres gardent leurs propriétés de transmittance avec la variation d'intensité). Remarquons qu'il est relativement *facile* d'augmenter le nombre de primaires et de diminuer la taille du système global dans le cas d'un seul DMD. Les inconvénients sont principalement le color break up et la stabilité temporelle qui est moins bonne que dans les LCDs, mais très acceptable la plupart du temps.

3.2.7 Liquid Crystals on Silicon (LCoS)

Le dispositif de modulation de lumière en reflectance est basée sur les cristaux liquides déposés sur une plaque de silicone (Figure 13). La séparation des couleurs peut se faire soit par une roue à filtres, soit par des panneaux LCoS colorés.

3.2.8 systèmes multi-moniteurs et multi-projecteurs

Un moyen d'augmenter la résolution à moindre cout est d'utiliser plusieurs dispositifs d'affichages arrangés sous la forme de matrices. De nombreux travaux de recherches ont été et sont menés actuellement sur ce sujet. Les

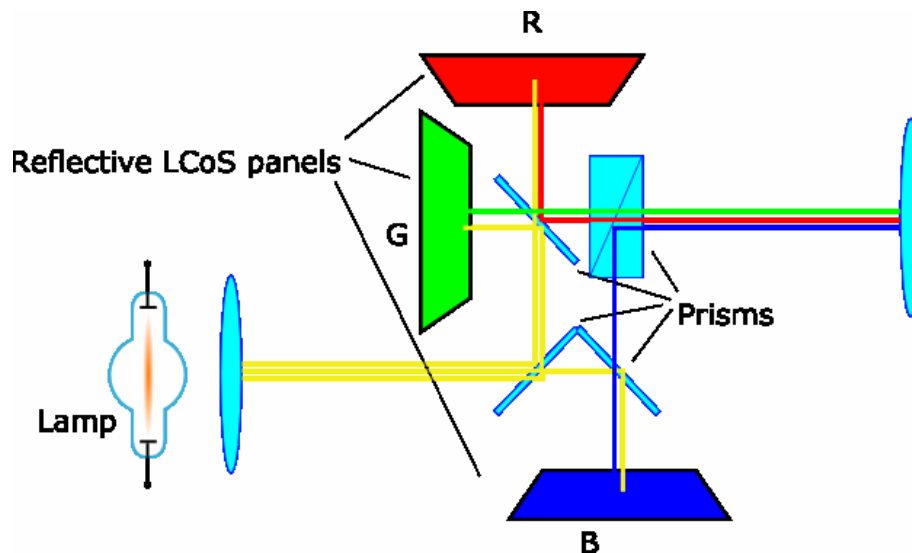


Figure 13. Technologie LCoS. Source <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lcos.svg>.

résultats de travaux plus anciens concernaient l'alignement géométrique. Les travaux actuels traitent de l'uniformité spatiale et de la scalabilité.

3.3 Dispositifs 3D

3.3.1 Holographie

L'image est capturée comme une image d'interférence. Une lumière laser cohérente est réfléchiée par l'objet et combinée sur un film avec la lumière de référence: Les deux rayons interfèrent. Le film enregistre les interférences en préservant l'information de phase. Lorsque le film est illuminé avec la même lumière, nous pouvons voir l'objet en 3D.

3.3.2 Stéréoscopie

Deux images différentes de la même scène sont envoyées à chaque oeil. Le cerveau interprète ces informations différentes comme des différences de perspective du même objet, donnant l'illusion de 3D. L'utilisation de lunettes spécifiques permet généralement de séparer les deux images. Différents moyens peuvent être utilisés, tels que lumière polarisée, combinée avec des polariseurs différents sur chaque oeil de la paire de lunette. Il est aussi possible d'utiliser différents signaux spectraux combinés avec des filtres spectraux pour chaque oeil de la paire de lunette.

Auto-stéréoscopie Le moniteur envoie différentes informations sur chaque oeil (sans le besoin de lunettes spéciales). Cependant la tête de l'observateur doit être positionnée correctement.

3.3.3 Heliodisplay

Le principe est de projeter les images sur un flux d'air comprimé ou un flux d'air humide ou n'importe quel autre support invisible. Puisqu'il n'y a pas d'information de profondeur liée à un support quelconque, un effet de 3D est créé. si on se place dans le cas d'une projection de face, l'observateur doit être localisé de biais par rapport à la source de lumière.

4. VOIR UN PEU PLUS LOIN...

Ici nous présentons pèle mèle un échantillon des technologies qui seront utilisés demain. Leur développement peut avoir été stoppé ou elle peuvent être déjà en commercialisation puisque le marché évolue très vite.

- Les cristaux photoniques peuvent améliorer la puissance lumineuses de DELs.² Ils sont déjà présents sur certains dispositifs d'affichages.
- TMOS (Time Multiplexed Optical Shutter) considère une assimilation temporelle superposée dans un état solide.³
- SED (Surface-conduction Electron-emitter Display) et FED (Field Emission Display). Le même principe que les CRTs est utilisé, mais en utilisant un système miniature similaire à un CRT derrière chaque pixel, tout en étant aussi fin qu'un panneau LCD. La technologie SED était supposée apparaître sur le marché ces dernières années, mais Canon et Toshiba qui développaient le projet ont arrêté son développement mi-2008 après l'abandon de Toshiba et des problèmes de propriété. Il semble maintenant que Canon ait repris le développement des SED au début 2009. La technologie FED semble avoir été rachetée à Sony au début 2010 par AU Optronics (qui a également prévu de commercialiser ses premiers moniteurs OLED dès début 2011). Elle aura donc peut-être une réalité dans future proche.
- Le concept de Dual view permet à deux personnes de regarder deux informations différentes sur le même écran (voir Figure 14). L'idée est la même que pour la stéréoscopie ou l'auto-stéréoscopie, soit en utilisant des lunettes spécifiques soit en envoyant les signaux dans des directions différentes.
- Système 3D réels. La Figure 15 montre une tentative pour créer un système capable de projeter l'information 3D telle quelle. L'aire de projection contient un gaz ionisé qui réagit et créé du plasma lorsqu'un rayon laser est focalisé à un certain endroit. Ce qui émet de la lumière. Il y a cependant un certain nombre de problèmes techniques liés à cette technologie.
- etc.

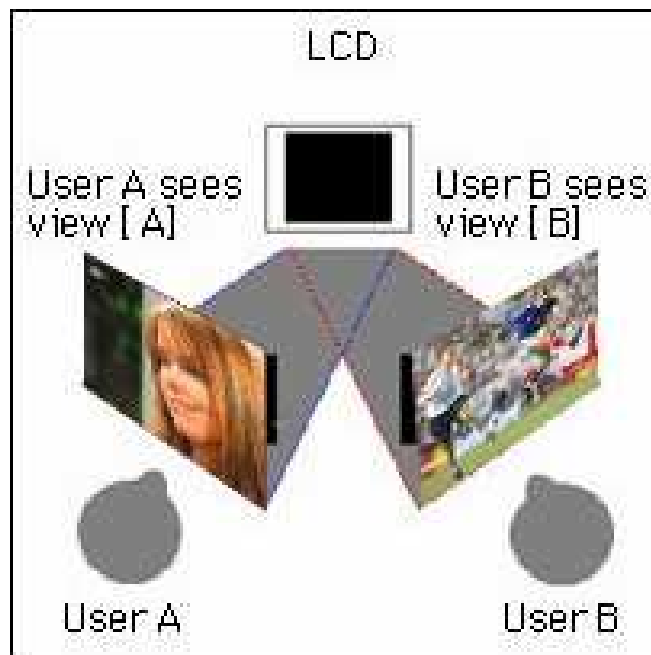


Figure 14. Concept Dual view. Source <http://img1.lesnumeriques.com/news/712.jpg>.

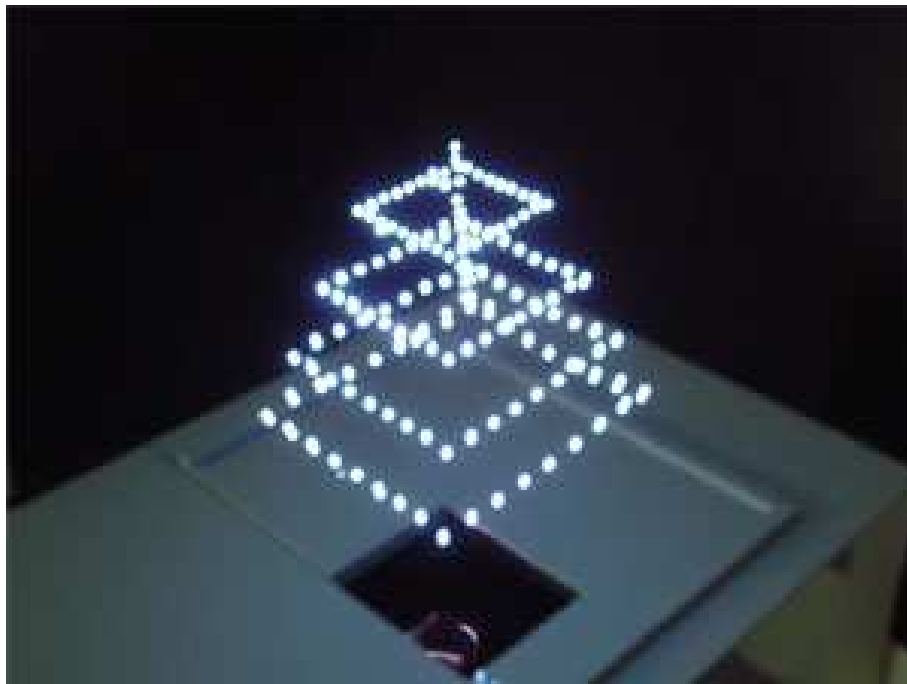


Figure 15. Un *vrai* système 3D. Source <http://www.physorg.com/news11251.html>.

5. MODIFICATION DE LA COULEUR ET EFFET BOITE NOIRE SUR LA CARACTÉRISATION COLORIMÉTRIQUE

Lorsque l'on considère la précision colorimétrique du rendu, un modèle doit être établie entre la valeur digitale en entrée et la couleur résultante. Cependant, il y a un certain nombre d'effets, volontairement mis en place par le fabricant pour améliorer la qualité perçue de l'image, qui rendent cette tâche encore plus compliquée qu'elle ne l'est déjà. Par exemple:

- Lorsqu'on utilise plus de trois primaires pour augmenter le nombre de couleur reproductibles, il y a besoin d'une transformée entre RGB et les $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$ primaires . De la même manière, les couleurs de l'image originale peuvent être *sur-saturées* par le fabricant pour être perue de manière plus plaisante par l'observateur. Ces transformées sont souvent tenues secrètes par le fabriquant et rendent difficile le contrôle de ces appareils. Cependant si la rponse est constante, il est possible de retrouver une modélisation similaire via la mesure et l'analyse du comportement du dispositif.
- Lorsqu'une image noire est intercalée entre toutes les images pour réduire le motion blur, lorsqu'une limite de puissance utilisable réduit la luminance d'une image si elle est très lumineuse, la modification devient dépendant de l'image. Ces transformations sont plus problématiques, dans le sens ou d'une part, elles ne sont pas transparentes, d'autre part, elles sont prévues pour solutionner un problème technique, et dans la plupart des cas ne sont pas optionnelles. Le rendu couleur est alors modifié de faon critique selon le contenu.

Ces avancées techniques deviennent des problèmes techniques pour la calibration et la caractérisation colorimétrique des systèmes.

Nous sommes en présence d'un paradoxe: En tant que scientifiques, nous voulons des systèmes stables, contrôlables, colorimétriques. Cependant en tant qu'utilisateur standard, nous voulons une image plaisante. Jusqu'à aujourd'hui, les mêmes produits étaient utilisés pour les deux usages. Il semble que les dispositifs d'affichages vont se spécialiser de plus en plus selon l'usage.

6. CONCLUSION

Nous espérons que cette introduction aux technologies d'affichages a permit d'appréhender un peu mieux les dessous des technologies et la difficulté quand au choix d'un appareil pour une application donnée.

La recommandation que nous faisons de manière générale est que le choix de l'acquisition d'un moniteur ou d'un projecteur doit être murement réfléchi et doit être en adéquation avec l'usage que l'on veut en faire.

REFERENCES

1. C. Elliott, T. Credelle, and M. Higgins, “Adding a white subpixel,” *Information Display Magazine* , May 2005.
2. A. Arsenault, D. Puzzo, I. Manners, and G. Ozin, “Photonic-crystal full-colour displays,” *Nature Photonics* **1**(8), pp. 468 – 472, 2007.
3. M. Selbrede and B. Yost, “Time multiplexed optical shutter (tmos) display technology for avionics platforms,” *Proc. SPIE* **6225**, p. 62251B, 2006.