

LE CINÉMA 3D SUR VOTRE PAILLASSE DE TP

ROMAIN ALBERT

Les méthodes de cinéma stéréoscopique s'appuyant sur la polarisation de la lumière ne sont pas nouvelles mais leur démocratisation est récente. Nous proposons ici une méthode permettant de réaliser une projection 3d à l'aide de matériel courant d'optique. Nous expliquerons ensuite son fonctionnement en s'appuyant sur le programme de CPGE.

1. INTRODUCTION

Le cinéma en trois dimensions n'est pas quelque chose de nouveau. Le premier « film » 3d tourné remonte à 1915 [1], il ne possède pas de nom et se compose d'un ensemble de tests qui a été projeté près de New York. Il existe de très nombreuses manières de projeter un film 3d mais le principe est toujours le même : il faut que chaque œil reçoive une image différente. Pour ce faire, le film 3d est réalisé en utilisant deux caméras dont les points de prise de vue sont séparés par la distance moyenne entre nos deux yeux. Ainsi en envoyant l'image captée par la caméra droite sur l'œil droit et l'image gauche sur l'œil gauche, notre cerveau va reconstituer la profondeur comme c'est le cas habituellement. Pour réaliser ceci, il existe principalement trois méthodes ayant recouru à des lunettes pour le spectateur. Des méthodes n'utilisant pas de lunettes existent, c'est le cas des méthodes holographiques ou encore de ceux utilisant un réseau de microlentilles, mais qui sont encore au stade de prototype.

Historiquement, la première est le procédé d'anaglyphe (datant de 1853 [2]) qui se base sur les couleurs complémentaires et la synthèse soustractive (Figure 1). On superpose sur l'écran l'image droite colorée en cyan et l'image gauche colorée en rouge. Le spectateur dispose lui d'une paire de lunettes où le verre droit est coloré en rouge et le verre gauche en cyan. Chaque filtre absorbant sa propre couleur et laissant traverser la couleur complémentaire, chaque œil reçoit l'image qui lui est destinée. On reproduit ainsi la vision binoculaire de l'homme et l'effet stéréoscopique fonctionne. Le problème de cette technique est la dégradation des couleurs liée à son principe même mais elle présente l'avantage d'utiliser des lunettes très bon marché.

La seconde méthode exploite les propriétés des cristaux liquides. Les lunettes sont constituées de deux verres pouvant être rendus opaques sous l'effet d'une électronique de

contrôle (les lunettes sont actives). Ces verres utilisent la même technique que les écrans LCD, technique qui sera expliquée dans la suite. Les images correspondant à chacun des yeux sont projetées successivement, les lunettes obturent alternativement l'œil qui n'est pas concerné. Cette méthode possède quelques problèmes qui font qu'elle est moins utilisée : les lunettes sont coûteuses et fragiles à cause de l'électronique de commande et des verres à cristaux liquides. De la même manière, ces lunettes possèdent une batterie limitant à la fois leur autonomie et leur durée de vie.

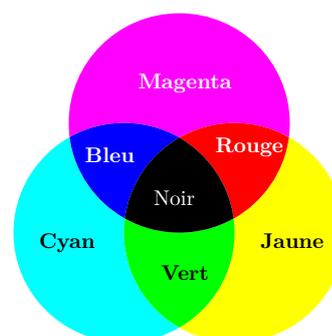


Fig. 1 Principe de la synthèse soustractive. Un filtre rouge va absorber ces deux couleurs complémentaires, le bleu et le vert, et laissera ainsi passer le cyan. Tandis qu'un filtre cyan absorbe le magenta et le jaune et laisse ainsi passer le rouge.

La dernière méthode exploite la polarisation de la lumière et c'est celle-ci qui sera détaillée dans la suite. Nous proposerons tout d'abord une méthode expérimentale permettant de réaliser relativement facilement un cinéma stéréoscopique en salle de travaux pratiques. Nous apporterons ensuite les éléments théoriques permettant de comprendre le fonctionnement du dispositif en s'appuyant sur le programme des classes préparatoires (nouveau programme 2013).

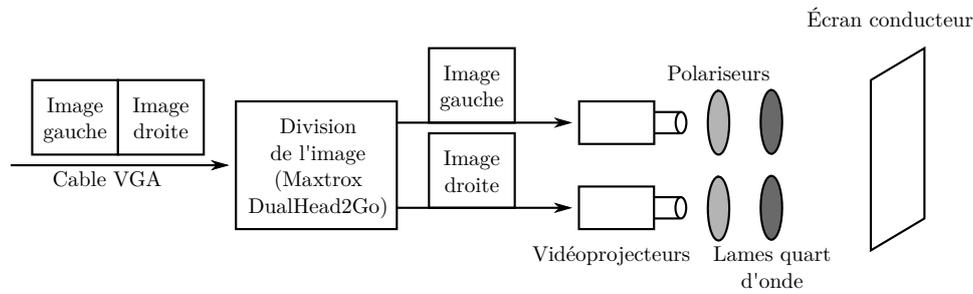


Fig. 2 Vue schématique de l'ensemble du dispositif expérimental.

2. RÉALISATION EXPÉRIMENTALE

Le but de cette partie est d'expliquer pas à pas la réalisation du montage expérimental permettant d'obtenir un effet stéréoscopique à partir de deux vidéoprojecteurs. Ce réglage est divisé en deux grandes étapes : l'alignement des vidéoprojecteurs et la production d'états particuliers de polarisation de la lumière qui seront utilisés pour diriger l'image d'un vidéoprojecteur vers l'œil correspondant. Les réglages sont parfois un peu compliqués par l'utilisation d'un type de vidéoprojecteur (tri-LCD) particulier. Ils ont été choisis car ils n'étaient plus utilisés au sein de l'ENS de Lyon et ont donc été récupérés pour réaliser cette expérience. Les vidéoprojecteurs à simple LCD ou DMD (utilisés dans les salles commerciales de cinéma) sont légèrement plus simple d'utilisation.

2.1. Réglage des deux vidéoprojecteurs

L'alignement et l'ajustement du zoom des deux vidéoprojecteurs sont compliqués, cette étape doit être faite avec beaucoup de soin sinon l'effet stéréoscopique ne pourra pas avoir lieu. Par ailleurs, toutes modifications ultérieures de la position de l'écran ou des vidéoprojecteurs détruiraient à coup sûr ce réglage. De plus, il faut utiliser idéalement des vidéoprojecteurs identiques pour s'assurer d'avoir la même luminosité ainsi que la même résolution.

La première étape consiste à relier les vidéoprojecteurs à l'ordinateur, deux possibilités s'offrent à nous :

- Utiliser un ordinateur avec deux sorties vidéo : il faut faire attention dans la mesure où les deux sorties vidéos peuvent être traitées de manières différentes : une en sortie principale et une en secondaire. Ceci peut entraîner des complications, en effet l'espace utile peut être différent à cause de la présence de la barre des tâches par exemple. De plus, il est plus compliqué d'étendre l'image sur ceux-ci. Enfin, si les deux sorties vidéos ne sont pas sur la même carte graphique, il y a des risques de latences différentes entre les deux images projetées, ce qui peut détruire l'effet stéréoscopique.
- Utiliser un boîtier de division d'image : c'est la méthode que nous utiliserons. Nous exploitons un boîtier Matrox (DualHead2Go Digital Edition [3]) qui prend une image en entrée, la divise horizontalement en deux en les renvoyant sur ces deux sorties. C'est en reliant les vidéoprojecteurs à ce dispositif que l'on choisit quelle image (droite ou gauche) l'appareil va projeter. Un schéma du fonctionnement est proposé

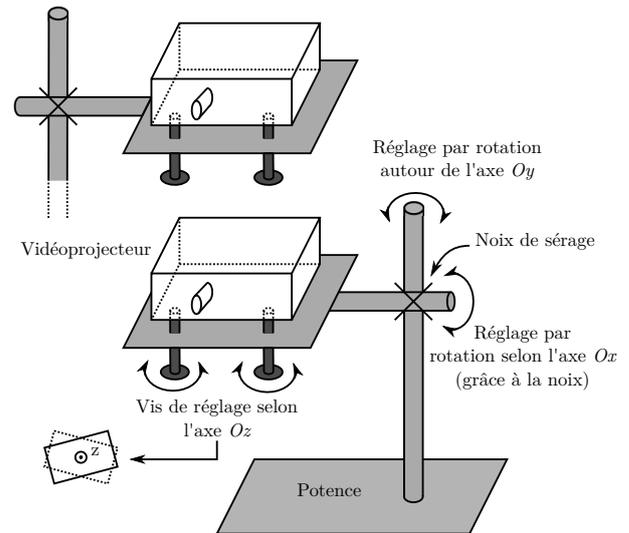


Fig. 3 Dispositif expérimental visant à régler l'alignement des deux vidéoprojecteurs. Ils sont superposés sur deux potences différentes pour des raisons de poids, ces deux potences étant reliées par des tiges pour stabiliser le système.

sur la Figure 2. L'utilité des polariseurs et lames quart d'onde sera expliquée dans la prochaine partie.

Passons maintenant à la réalisation expérimentale concrète :

- Placer les vidéoprojecteurs sur leur potence respective tel que décrit sur la Figure 3. Il est important d'essayer de superposer verticalement les objectifs de projections des deux vidéoprojecteurs. En effet, ils ne peuvent pas rectifier les erreurs de parallaxe selon leur axes Oy , il faut donc qu'ils aient la même erreur.
- Placer l'écran à la distance voulue. Faire le réglage de netteté des vidéoprojecteurs. Une distance de 2 à 3 mètres entre l'écran et le vidéoprojecteur est requise pour rendre possible cette opération. Par ailleurs l'écran utilisé doit être conducteur pour éviter de perdre la polarisation lors de la réflexion, une plaque métallique dépolie fonctionne.
- Faire l'ensemble des branchements électriques nécessaires. Régler la résolution de l'ordinateur pour obtenir une taille double de la résolution native des vidéoprojecteurs. Le plus simple est de démarrer Windows avec le dispositif branché.

- En cas d'utilisation de deux vidéoprojecteurs différents, ajuster leur luminosité sur une image blanche.
- Projeter l'image de deux grilles identiques accolées horizontalement.
- Régler le zoom des vidéoprojecteurs pour que les deux images aient approximativement la même taille.
- En agissant sur les vis de réglage, faire en sorte d'avoir deux images aussi parallèles que possible. On peut également agir sur l'horizontalité des potences pour ce réglage.
- Superposer les deux grilles sur l'écran. Idéalement les deux images doivent être superposées sur l'ensemble de l'écran, mais un réglage à quelques pixels près dans la partie centrale peut suffire.
- Ne plus toucher les vidéoprojecteurs dans la suite !

2.2. Production d'ondes polarisées circulairement

Un fois ce réglage fait, il faut s'assurer que chaque œil reçoit son image propre. Nous allons utiliser pour ceci des états de polarisation particulière de la lumière pour conserver l'information de l'œil auquel elle est destinée. Ces états sont des ondes électromagnétiques polarisées circulairement qui peuvent être produits à partir d'une onde polarisée rectilignement traversant ensuite une lame quart d'onde. Ces ondes sont analysées par les lunettes de cinéma 3d usuellement utilisées. Les éléments théoriques pour expliquer le fonctionnement de ce dispositif sont disponibles dans les Parties 3.3 et 3.4.

La première étape est d'obtenir une onde polarisée rectilignement. En fonction du vidéoprojecteur utilisé, la méthode diffère (les raisons techniques sont présentées Partie 3.2) :

- Pour un vidéoprojecteur LCD standard, il n'y a rien à faire, l'onde possède naturellement une polarisation rectiligne en sortie.
- Pour un vidéoprojecteur DMD/DLP, il suffit de placer un polariseur dichroïque standard.
- Les vidéoprojecteurs tri-LCD, employés ici, pourraient être aussi simple que les vidéoprojecteurs LCD standards mais les différentes couleurs possèdent des directions de polarisations différentes (ce qui n'est pas le cas de l'ensemble des vidéoprojecteurs tri-LCD). Il est donc absolument nécessaire d'observer si les couleurs changent en présence d'un polariseur dichroïque ou si seule l'intensité varie. Par exemple les polarisations des couleurs primaires sont présentées sur la Figure 4.

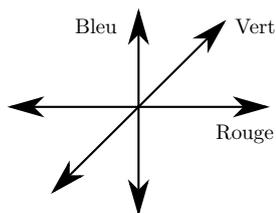


Fig. 4 Direction de polarisation en fonction de la couleur en sortie du vidéoprojecteur tri-LCD utilisé.

Pour réaliser les états de polarisation correspondant

à chaque œil, on commence par celui attribué à l'œil gauche. Il suffira d'inverser ensuite l'ensemble des indications droite-gauche. À la fin de cette étape, le montage ressemble à celui présenté en Figure 5 pour chacun des vidéoprojecteurs.

- Envoyer une image dont la partie gauche est blanche et la partie droite est noire.
- Placer un polariseur dichroïque en sortie du vidéoprojecteur sur une potence différente de celle des vidéoprojecteurs. Tourner le polariseur jusqu'à ce que l'image soit la plus blanche possible. Comme on peut le voir à la Figure 4, la position optimale est normalement alignée sur la polarisation de la couleur verte. Il faut théoriquement atténuer la couleur verte en réglant le vidéoprojecteur mais la balance légèrement faussée des couleurs n'est pas très gênante en pratique.
- Chausser les lunettes de cinéma 3d passives, ce sont celles que l'on utilise habituellement dans les cinémas. La suite des réglages se fait plus simplement en regardant l'écran.
- Envoyer une image dont la partie droite est blanche et la partie gauche est noire.
- Ajouter une lame quart d'onde, idéalement optimisée pour travailler dans le vert (vers $500 - 550 \text{ nm}$). En tournant la lame, faire en sorte de minimiser l'intensité lumineuse arrivant sur l'œil droit. Il ne faut pas s'attendre à une extinction totale mais normalement l'intensité est très fortement atténuée.

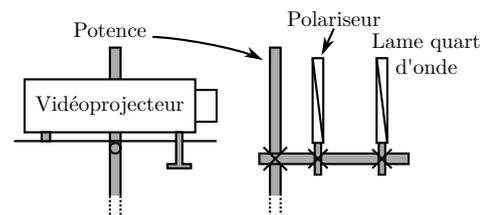


Fig. 5 Schéma du dispositif de polarisation. Les croix représentent les noix de serrage. Il est à noter que les deux ensembles polariseur-lame quart d'onde peuvent être placés sur la même potence.

2.3. Projection du film 3d

Pour que ce dispositif fonctionne, il n'y a plus qu'à lire en plein écran (important pour l'alignement) un film où les images gauche et droite ont été accolées et à se placer orthogonalement à l'écran pour que la polarisation circulaire ne soit pas dégradée à la réflexion. Le film 3d utilisé est un film de démonstration pour Blender "Elephants Dream" [4] qui est libre et ne posera donc pas de problème de droits d'auteur.

Il ne vous reste donc plus qu'à admirer le spectacle, ou à lire la partie expliquant la théorie sous-jacente à cette technique d'imagerie 3d.

3. LES ÉTATS DE POLARISATION DE LA LUMIÈRE

Nous allons maintenant expliquer le fonctionnement des différents éléments composant notre dispositif expé-

rimentale. Pour ce faire nous nous appuyerons sur le programme de classe préparatoire de 2014. Les notions utilisées peuvent être retrouvées sur les livres de Physique de 2^{ème} année PC-PC* de l'ancien programme comme [5] ou [6]. Pour aller plus loin, on pourra s'appuyer sur [7] qui propose une discussion un peu plus poussée.

3.1. La polarisation rectiligne

Dans la mesure où toute onde peut être décomposée en une superposition d'ondes planes, nous ne considérerons que celles-ci dans la suite. Pour simplifier, nous considérerons uniquement des ondes se propageant dans la direction \mathbf{u}_z .

De manière générale, une onde plane polarisée rectilignement s'écrit simplement :

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - kz) \quad (1)$$

où \mathbf{E}_0 est la direction de polarisation.

La plupart des sources de lumière (lampe à incandescence, fluo-compact, LED) ne possèdent pas de polarisation simple, le champ créé possède un vecteur \mathbf{E}_0 d'amplitude constante mais de direction aléatoire. C'est pourquoi on les qualifie de sources polarisées aléatoirement. On peut obtenir une onde polarisée rectilignement en dirigeant cette lumière sans polarisation à travers un polariseur dichroïque.

Le polariseur dichroïque est un milieu anisotrope, ces propriétés dépendent de la direction du champ. Ce milieu va absorber le champ selon une direction particulière tandis qu'un champ dans une direction orthogonale ne va pas être absorbé. Ainsi si une onde polarisée aléatoirement le traverse, la composante colinéaire à la direction d'absorption va disparaître et l'onde sera polarisée rectilignement dans la direction orthogonale.

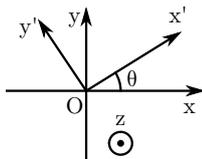


Fig. 6 Repères directs d'étude. Les deux repères ne diffèrent que par une rotation d'angle θ autour de Oz .

L'étude de l'impact d'un polariseur dichroïque sur une onde déjà polarisée rectilignement est riche d'intérêt. Considérons une onde incidente polarisée rectilignement selon la direction \mathbf{u}_x et un polariseur dichroïque dont l'axe passant est selon $\mathbf{u}_{x'}$ a subi une rotation d'un angle θ . Les repères sont décrits sur la Figure 6, l'onde incidente peut être écrite sur les deux repères (simple projection) :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(z, t) &= E_0 \mathbf{u}_x \cos(\omega t - kz) \\ &= (E_0 \cos \theta \mathbf{u}_{x'} + E_0 \sin \theta \mathbf{u}_{y'}) \cos(\omega t - kz) \end{aligned} \quad (2)$$

Dans la mesure où seule la partie de l'onde selon l'axe passant traverse le système, l'onde en sortie du polariseur s'écrit :

$$\mathbf{E}(z, t) = E_0 \cos \theta \mathbf{u}_{x'} \cos(\omega t - kz) \quad (3)$$

Donc si on note I_0 l'intensité de l'onde incidente, l'intensité I en sortie de l'analyseur s'écrit :

$$I(\theta) \propto \langle \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{E}(t) \rangle = I_0 \cos^2 \theta \quad (4)$$

où $\langle \rangle$ représente la moyenne temporelle du détecteur. L'intensité est la grandeur pertinente dans la mesure, c'est ce à quoi l'œil est sensible. Cette loi s'appelle la loi de Malus.

En partant de ce principe, on peut facilement imaginer un dispositif permettant de réaliser un effet stéréoscopique. On polarise rectilignement l'image pour l'œil droit selon \mathbf{u}_x et l'œil gauche selon \mathbf{u}_y (directions orthogonales) avant de les superposer sur l'écran. On donne ensuite au spectateur une lunette où le verre droit possède un polariseur passant selon \mathbf{u}_x et un verre gauche selon \mathbf{u}_y . L'image droite traverse le verre droit et est absorbée par le verre gauche (et vice-versa à gauche). Cette méthode permet donc bien d'envoyer une image différente sur chaque œil et ainsi d'obtenir un effet stéréoscopique.

Cette méthode a été notamment utilisée au Futuroscope de Poitiers. Malheureusement, on peut facilement voir les limites de cette méthode. Si on tourne la tête de 45° , les images droite et gauche seront mélangées sur les yeux, ce qui détruit l'effet 3d et rend l'image floue. Il faut donc garder la tête relativement droite pendant toute la séance.

3.2. Polarisation des vidéoprojections

Comme nous l'avions précisé dans la partie expérimentale, nos sources doivent être polarisées rectilignement pour obtenir des ondes polarisées circulairement facilement. Nous allons voir quel rôle joue la polarisation dans les vidéoprojecteurs courants en expliquant rapidement leur fonctionnement. La source principale pour cette partie est la référence [8]. Il y a plusieurs techniques et de nombreuses variantes, nous nous contenterons d'en détailler deux parmi les plus courantes.

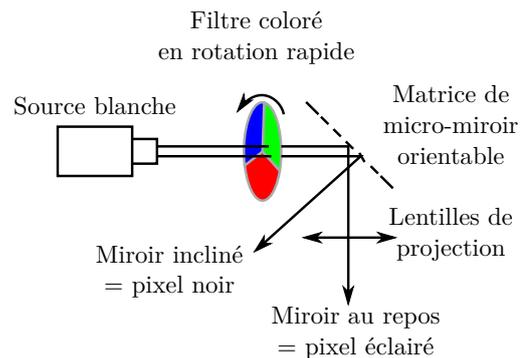


Fig. 7 Principe du vidéoprojecteur DLP/DMD. En variant très rapidement leur position, les micro-miroirs modifient l'intensité réfléchie par la dalle et donc l'image sur l'écran.

Les vidéoprojecteurs DLP/DMD sont présentés en Figure 7, ils utilisent une dalle constituée de miroirs très petits (taille micrométrique) dont on peut faire varier très rapidement la position. Ainsi on peut régler l'intensité qui est renvoyée par la dalle en fonction de la position du miroir. Pour régler séparément les trois couleurs on utilise une roue chromatique. Elle est constituée de filtres

de couleur primaire. En tournant, la lumière qui arrive sur la dalle a été filtrée et on constitue successivement les 3 images de couleurs différentes. Ce type de vidéoprojecteur n'est pas polarisé et un simple polariseur dichroïque permet d'obtenir la polarisation rectiligne nécessaire pour réaliser les polarisations circulaires. Il a été le premier utilisé dans les cinémas pour les projections de films numériques, un dérivé de cette technologie est employé en pratique pour les projections de films 3d.

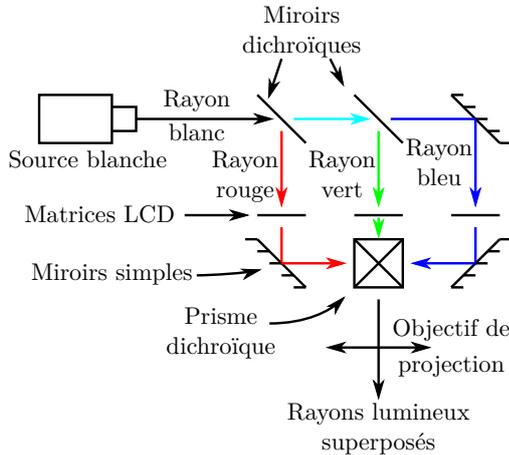


Fig. 8 Principe du vidéoprojecteur tri-LCD. Ce sont ici les pixels des matrices LCD qui permettent de faire varier l'intensité.

Un second type de vidéoprojecteur utilise trois dalles LCD monochromes (tri-LCD de son nom commercial), un schéma est proposé en Figure 8. Ces dalles sont constituées de pixel LCD dont le principe est expliqué en figure 9. Ces vidéoprojecteurs exploitent des miroirs capables de séparer des couleurs, ainsi le premier miroir va renvoyer une couleur primaire (ici le rouge) sur une première dalle LCD qui va créer une image rouge. Les deux autres couleurs traversent le miroir et sont séparées sur un deuxième miroir qui va renvoyer une couleur (ici le vert) sur une autre dalle LCD et créer la partie verte de l'image. Il ne reste plus que du bleu qui est utilisé pour constituer l'image bleu. Ensuite, ces trois images sont superposées à l'aide d'un prisme dichroïque avant d'être projetées à l'aide de lentilles.

Cette technique est intrinsèquement polarisée rectilignement à cause de la structure des pixels (Figure 9). Les 3 couleurs ne possèdent en général pas la même polarisation, ce qui pose problème dans notre cas. Il peut être contourné à l'aide d'un polariseur, comme détaillé précédemment (voir Partie 2.2).

3.3. Les polarisations circulaire

Avant de comprendre comment produire des ondes polarisées circulairement, une onde polarisée circulairement s'écrit de manière générale :

$$\mathbf{E}(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \mathbf{u}_x \pm E_0 \sin(\omega t - kz) \mathbf{u}_y \quad (5)$$

On reconnaît alors l'équation d'un cercle dans les plans à z constant. Lorsque le signe est positif, le cercle est

parcouru dans le sens trigonométrique, c'est ce que l'on appelle une onde polarisée circulairement gauche. Au contraire, si on considère le signe $-$, on obtient une onde polarisée circulairement droite car le cercle est parcouru dans le sens anti-trigonométrique.

Si on fait l'hypothèse que l'on peut produire et séparer les polarisations circulaires en fonction de leur chiralité (gauche ou droite), on peut facilement fabriquer un cinéma stéréoscopique. En effet il suffit de polariser circulairement gauche l'image gauche et idem pour l'image droite et de les envoyer sur l'écran. Les lunettes n'ont plus qu'à faire l'analyse des polarisations circulaires pour diriger l'image vers le bon œil. Une onde polarisée circulairement ne possédant pas d'axe privilégié, les mouvements du spectateur n'influencent pas la qualité de la perception. Naturellement, cette solution présente des inconvénients : les moyens employés pour polariser et analyser les polarisations circulaires sont plus complexes.

3.4. Production d'une onde polarisée circulairement

Pour polariser circulairement, nous allons exploiter le phénomène de biréfringence. L'objet de cet article n'étant pas de discuter de la biréfringence, nous présenterons uniquement les notions utiles à sa compréhension. Le lecteur intéressé pourra se référer à [10] qui est assez complet.

Les matériaux biréfringents sont des matériaux diélectriques qui ne présentent pas les mêmes propriétés optiques dans toutes les directions. Dans la suite, on considère un milieu biréfringent uniaxe où deux axes propres d'indices différents font partie du plan Oxy , orthogonal à la direction de propagation (Oz) des ondes planes. On considère que l'axe rapide est la direction $\mathbf{u}_{x'}$ avec un indice $n_{x'}$ et l'axe lent est selon la direction $\mathbf{u}_{y'}$ avec un indice $n_{y'}$. L'axe rapide possède un indice optique plus petit que l'axe lent : $n_{x'} < n_{y'}$. Pour clarifier ces notations et le système étudié, voir la Figure 10

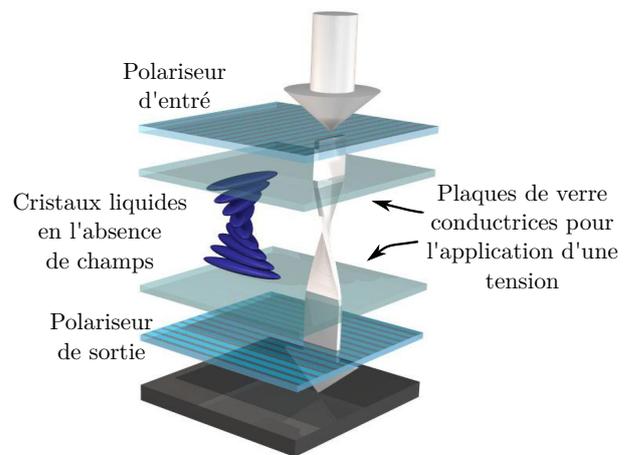


Fig. 9 Pixel à cristaux liquides le plus simple (image tirée de [9]). Il est présenté dans l'état passant, en l'absence de champ électrique entre les plaques de verre. En présence d'un champ, les cristaux s'alignent sur ce champ. La polarisation ne tourne plus, le pixel est alors non passant.

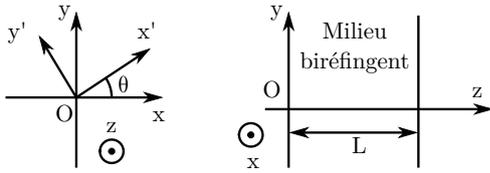


Fig. 10 Représentation du système étudié, θ représente comme précédemment la rotation des systèmes d'axe du champ et du milieu biréfringent (de longueur L).

On éclaire ce milieu avec une onde polarisée linéairement selon \mathbf{u}_x : $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{u}_x$. Par ailleurs on fixe la phase de l'onde à zéro sur la face d'entrée du milieu biréfringent. Le champ à l'entrée du milieu peut donc s'écrire dans le repère $(\mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'})$ lié au milieu :

$$\mathbf{E}(z, t) = (E_0 \cos \theta \mathbf{u}_{x'} + E_0 \sin \theta \mathbf{u}_{y'}) \cos(\omega t - kz) \quad (6)$$

Calculons le champ en sortie du milieu biréfringent. On considérera que la transmission aux interfaces est parfaite. Par ailleurs, l'indice optique étant différent en fonction l'axe, le nombre d'onde est différent : $k_{x'} = 2\pi n_{x'}/\lambda$ et $k_{y'} = 2\pi n_{y'}/\lambda$. On obtient alors le champ sur la face de sortie :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(z = L, t) = & E_0 \cos \theta \mathbf{u}_{x'} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_{x'} L\right) \\ & + E_0 \sin \theta \mathbf{u}_{y'} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_{y'} L\right) \end{aligned} \quad (7)$$

En redéfinissant l'origine des phases, on obtient :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(z = L, t) = & E_0 \cos \theta \mathbf{u}_{x'} \cos(\omega t) \\ & + E_0 \sin \theta \mathbf{u}_{y'} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n) L\right) \end{aligned} \quad (8)$$

où $\Delta n = n_{y'} - n_{x'}$.

Donc pour obtenir une onde polarisée circulairement, il faut que :

$$\frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n) L = \varphi = \pi/2 + p\pi \quad (9)$$

où p est entier. De plus il faut que l'amplitude sur les deux axes soit identique : $\theta = \pm\pi/4$. On obtient alors une onde polarisée circulairement droite ou gauche en fonction du signe de θ et de la valeur de l'entier p . Ce type de lame est appelé une lame quart d'onde, en effet, un déphasage de $\pi/2$ correspond directement à un retard d'un quart de longueur d'onde.

Cependant, comme on peut le voir dans l'équation (9), le critère d'accord dépend de la longueur d'onde. Une lame quart d'onde ne peut pas avoir un retard de $\pi/2$ pour l'ensemble du spectre visible. La qualité de la polarisation circulaire dépendra donc de la longueur d'onde. Dans le cas présent, nous utilisons une lame quart d'onde ajustée dans le vert car c'est le maximum de sensibilité de l'œil. Le violet et le rouge ne seront pas parfaitement filtrés par l'analyseur (constitué simplement d'une lame quart d'onde puis d'un polariseur), ce qui n'est pas très grave car l'œil y est beaucoup moins sensible.

4. CONCLUSION

Ce type de dispositif permet de discuter de la production et de l'usage des ondes polarisées circulairement, sujet sur lequel il existe peu de manipulations allant au delà d'une simple production/analyse de polarisation circulaire en monochromatique. Ce montage permet notamment de parler de la difficulté posée par la lumière polychromatique et d'illustrer l'ensemble sur un exemple ludique. Par ailleurs, il permet de mettre en perspective la qualité des projections actuelles par rapport aux résultats obtenus avec ce type de montage et ainsi de réenchanter un peu le cinéma 3d qui reste une belle réussite technique.

J'ai réalisé ce montage durant ma préparation à l'agrégation de physique. Cet article est la preuve qu'elle peut être fun. Elle constitue par ailleurs une excellente formation expérimentale.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble des préparateurs de physique qui nous ont beaucoup aidé pendant l'agrégation. Je remercie Benoit Capitaine et Christian Balesio qui m'ont permis de réaliser cette manipulation en fabriquant les supports et en commandant le matériel.

Je remercie également Sylvain Joubaud, Michel Fruchart et Thomas Le Reun pour leurs relectures essentielles ainsi que pour nos discussions très fructueuses.

RÉFÉRENCES

- [1] L. DENIG. *Stereoscopic Pictures Screened*. Moving Picture World, juin 1915, p. 2072.
- [2] W. ROLLMANN. "Zwei neue stereoskopische Methoden". In : *Annalen der Physik* 166 (1853), p. 186–187.
- [3] *Boîtier Matrox de division d'image*. <http://www.matrox.com/graphics/en/products/gxm/dh2go/digital/>.
- [4] *Film de démonstration « Elephants Dream »*. <https://orange.blender.org/blog/elephants-dream-in-stereoscopic-3d/>.
- [5] A.E. BADEL et al. *Physique Tout-en-un 2e année PC-PSI : Cours et exercices corrigés*. J'intègre (Paris). Dunod, 2004. ISBN : 9782100483846.
- [6] J.M. BRÉBEC et al. *Optique ondulatoire : 2e année, MP-MP*, PC-PC*, PSI-PSI*, PT-PT**. H prépa. Hachette supérieur, 2004. ISBN : 9782011456373.
- [7] E. HECHT et al. *Optique*. Pearson, 2005. ISBN : 9782744070631.
- [8] Francis MAHIEU. "Télévision haute définition (TVHD) - Affichage. Qualité - Affichage HD". In : *Techniques de l'ingénieur TE5684* (fév. 2011).

- [9] *Schéma de fonctionnement d'un pixel LCD dans l'état passant.* https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LiquidCrystalDisplay-field_off.jpg.
- [10] J.R. CHAMPEAU, R. CARPENTIER et I. LORGERÉ. *Ondes lumineuses : Propagation, optique de Fourier, cohérence.* LMD Physique. De Boeck Supérieur, 2009, p. 709–790. ISBN : 9782804158897.

□ ROMAIN ALBERT
M2 Sciences de la Matière
Physique, Concepts et Applications
ENS de Lyon - Université Lyon 1
romain.albert@ens-lyon.fr