

RAPPORT UIT-R BT.2088

Télévision stéréoscopique

(2006)

1 Introduction

Les systèmes d'images stéréoscopiques permettent de donner une impression de relief sur un écran plat. Ils ont été conçus pour le cinéma, la télévision et d'autres utilisations comme l'imagerie médicale. Il ne faut pas les confondre avec l'holographie, qui nécessite des lasers et qui, d'une manière générale, est incompatible avec les technologies existantes du cinéma ou de la télévision.

En imagerie fixe, la stéréoscopie existe presque depuis l'invention de la photographie au milieu du XIXe siècle. Concernant les images animées, elle est présente sur le marché depuis les années 1950.

Les documents de l'UIT-R sur la télévision stéréoscopique comportent actuellement une Question en vigueur et une autre Question en cours d'approbation, deux Rapports et deux Recommandations:

Question UIT-R 88/6 – Evaluation subjective des images de télévision stéréoscopiques.

Rapport UIT-R BT.312 – Constitution d'un système de télévision stéréoscopique (dernière mise à jour: 1990). Ce Rapport décrit brièvement des techniques de reproduction d'images stéréoscopiques, énumère les conditions nécessaires à l'élaboration de systèmes concrets de télévision stéréoscopique, donne une liste de documents de l'ex-CCIR sur le sujet et contient une brève bibliographie.

Rapport UIT-R BT.2017 – Télévision stéréoscopique – Profil multivues MPEG-2.

Ce Rapport décrit l'Amendement 3 à la norme de codage vidéo MPEG-2 (Recommandation UIT-T H.262/ISO/CEI 13818-2), approuvé en 1996, permettant de coder des images stéréoscopiques.

Recommandation UIT-R BT.1198 – Télévision stéréoscopique basée sur deux voies œil droit et œil gauche (1995).

Cette Recommandation donne une brève (une seule page) liste de critères de compatibilité entre des signaux monoscopiques et stéréoscopiques pour la radiodiffusion et fait expressément mention des écrans autostéréoscopiques dans les considérations.

Recommandation UIT-R BT.1438 – Evaluation subjective des images de télévision stéréoscopiques (d'après la Question UIT-R 88/6 – Evaluation subjective des images de télévision stéréoscopiques, anciennement Question UIT-R 234/11).

Cette Recommandation porte sur les facteurs d'évaluation, les méthodes d'évaluation, les conditions d'observation, la sélection des observateurs en fonction de leur vue et des images de test, comportant des images fixes et des séquences animées.

Il est temps de se pencher à nouveau sur le sujet de l'imagerie stéréoscopique pour plusieurs raisons:

- Les progrès techniques en matière de diffusion d'image ont entraîné le développement de grands écrans plats, à un prix de plus en plus abordable. Ces écrans constituent une plateforme idéale pour divers systèmes d'images stéréoscopiques.

- La technologie des ordinateurs personnels a encouragé le développement de lunettes à obturateurs LCD pour les jeux informatiques. Désormais, ces lunettes se trouvent facilement et à un prix abordable.
- L'avènement de la radiodiffusion numérique a entraîné une plus grande souplesse dans les formats de codage d'image. Cette souplesse permet d'avoir des images stéréoscopiques présentant une très grande compatibilité monoscopique, contrairement aux images stéréoscopiques analogiques, dans lesquelles des artefacts sont généralement visibles (image dédoublée, papillotement, «effet spectacle de marionnettes», etc.) et qui présentent une compatibilité monoscopique limitée.
- Les progrès en matière de génération d'images par ordinateur permettent maintenant de produire des images stéréoscopiques de synthèse très détaillées presque aussi facilement que les images monoscopiques.

2 Vision stéréoscopique et parallaxe

Les systèmes d'images stéréoscopiques utilisent deux images, une seule étant présentée à chaque œil. Pour que la parallaxe soit correcte, ces images doivent être prises depuis des positions dont la distance est voisine de l'écartement des yeux (environ 65 mm). La différence de point de vue depuis les deux positions permet de percevoir le relief lorsque le cerveau compare les deux images présentées séparément à l'œil droit et à l'œil gauche.

L'écartement étroit entre les positions de prise de vue impose certaines contraintes aux appareils de prise de vue et aux objectifs. Dans certains cas, cela restreint les combinaisons possibles d'ouverture et de distance focale. Le recours à des miroirs permet toutefois d'atténuer ces problèmes dans une certaine mesure. Cependant, il est actuellement impossible de procéder à un post-traitement des images stéréoscopiques pour modifier leur parallaxe. Il appartient donc à la fois au concepteur et à l'opérateur de l'appareil de prise de vue de tenir compte des effets de parallaxe en permanence.

En production d'images 3D, on fait souvent varier la parallaxe pour réaliser des effets spéciaux. Avec la parallaxe classique, l'image stéréoscopique apparaît derrière l'écran. On peut toutefois inverser la parallaxe en permutant les images droite et gauche pour faire apparaître l'image devant l'écran, auquel cas il en résulte des distorsions d'image. On peut aussi accentuer la parallaxe en faisant varier la distance entre objectifs pour renforcer ou réduire le relief apparent.

La parallaxe pose problème pour les images macro en gros plan car la distance focale peut être comparable à l'écartement des yeux, voire plus petite. Il peut s'ensuivre des effets désagréables en raison de la faible profondeur de champ et/ou du chevauchement insuffisant de l'image présentée à l'œil gauche et de celle présentée à l'œil droit et/ou des grands angles formés par l'objet visualisé et les positions de prise de vue. Pour résoudre ce problème, on peut délibérément déformer la parallaxe en mode macro en réduisant la distance entre objectifs sur l'appareil de prise de vue. On peut aussi courber les trajets optiques pour accroître le chevauchement des images. Cette technique est couramment utilisée en stéréomicroscopie. Etant donné que la parallaxe donne non seulement des informations de profondeur mais aussi des informations d'échelle, un effet secondaire de cette déformation de la parallaxe est que l'image est donnée à une échelle peu réaliste, apparaissant beaucoup plus grande que sa taille réelle. Cela permet de réaliser des effets spéciaux, que le cerveau peut compenser car il sait qu'il utilise un système de visualisation artificiel.

3 Compatibilité – Généralités

Tout comme il est souhaitable que la vidéo couleur soit compatible avec la vidéo monochrome, il est souhaitable que la vidéo stéréoscopique soit compatible avec la vidéo monoscopique classique. La plupart des premiers systèmes vidéo stéréoscopiques n'étaient pas vraiment compatibles avec les systèmes vidéo classiques et les images étaient floues et/ou papillotaient lorsqu'on les visualisait sur un écran normal. Cette question est abordée plus en détail pour chaque technique stéréoscopique.

4 Techniques et technologies d'affichage

La stéréoscopie existe depuis bien plus d'un siècle et son origine remonte aux travaux de Wheatstone et Brewster sur l'imagerie statique dans les années 1830. Comme les principales technologies utilisées pour les images animées stéréoscopiques faisaient intervenir une séparation des images par couleurs, les systèmes d'images animées stéréoscopiques n'ont commencé à être développés qu'après la deuxième guerre mondiale lorsque l'utilisation de films vierges en couleur s'est généralisée.

Un certain nombre de systèmes sont utilisés commercialement pour la visualisation d'images animées stéréoscopiques. La plupart de ces systèmes, à l'exception notable des systèmes à multiplexage temporel et des systèmes utilisant l'effet Pulfrich, sont développés à partir de techniques de photographie (image fixe) stéréoscopique, à savoir l'anaglyphe chromatique, l'anaglyphe par polarisation et l'anaglyphe intégré.

4.1 Ecrans distincts

4.1.1 Visiocasque

L'image pour l'œil droit et l'image pour l'œil gauche peuvent être présentées sur des écrans distincts portés sous forme de lunettes. Ces visiocasques ont été utilisés dans les premiers jeux vidéo de «réalité virtuelle». Toutefois, ces écrans et les images associées suivent les mouvements de la tête, ce qui peut être déconcertant, et en raison de la petite taille des écrans, la résolution est limitée. La technique n'est pas vraiment adaptée à une visualisation collective.

4.1.2 Ecrans côte à côte avec lunettes prismatiques

On peut aussi utiliser des écrans distincts à une certaine distance sous réserve que les trajets optiques jusqu'aux yeux sont convenablement courbés par des lunettes à miroirs ou à prismes. Cette technique exige que le spectateur déplace sa tête le moins possible, ce qui peut être assez fatigant.

4.2 Systèmes d'affichage d'anaglyphes

Les systèmes d'affichage d'anaglyphes superposent deux images pour n'en former qu'une seule puis les séparent par filtrage optique au moment de leur visualisation.

4.2.1 Séparation par filtres colorés (anaglyphe chromatique)

Toute combinaison de couleurs qui s'excluent mutuellement peut être utilisée pour l'affichage d'anaglyphes chromatiques. Pour que les couleurs soient complètement restituées sur l'image recombinaison par le cerveau, il faut utiliser des couleurs complémentaires pour l'œil gauche et l'œil droit: rouge/cyan, vert/magenta ou bleu/jaune. Par convention, on utilise le rouge et le cyan, car cette combinaison présente une caractéristique simple de longueurs d'onde passe-bas/passe-haut. Pour la combinaison vert/magenta, la correspondance des valeurs de luminance est meilleure (voir le Tableau 1), mais la caractéristique coupe-bande/passe-bande nécessaire est plus difficile à reproduire de façon précise et cohérente.

TABLEAU 1

Valeurs de luminance et rapports de luminances des couleurs complémentaires utilisées pour la représentation d'anaglyphes (utilisation de la colorimétrie PAL/SECAM/NTSC/SDTV)

Couleur 1	Couleur 2	Rapport de luminances
Rouge	Cyan	
$Y' = 0,299$	$Y' = 0,701$	2,34
Vert	Magenta	
$Y' = 0,587$	$Y' = 0,413$	1,42
Bleu	Jaune	
$Y' = 0,114$	$Y' = 0,886$	7,77

Les filtres colorés sont utilisés au moment de la prise de vue au moyen de deux appareils distincts. Les deux images sont ensuite mixées et présentées sous la forme d'une seule image pour la visualisation. Les deux parties de l'image sont ensuite séparées en deux images destinées respectivement à l'œil gauche et à l'œil droit par des lunettes avec des filtres rouge/cyan. Le spectre de transmission combiné de ces deux filtres est proche de la lumière blanche. Il s'agit de la technique stéréoscopique la plus ancienne et la meilleur marché pour les images animées et il existe de très nombreuses images dans ce format. La mise en œuvre de cette technique est aisée aussi bien pour le cinéma et pour la télévision, même si le réalisme de l'image est réduit par le fait que les informations de couleur reçues par chaque œil sont incomplètes. En effet, chaque œil ne reçoit qu'une partie des couleurs. Mais cette technique présente les avantages suivants: un seul projecteur de cinéma ou écran de télévision est nécessaire et la séparation des images pour le spectateur est passive et ne nécessite donc ni énergie, ni circuits, ni synchronisation, ni distribution.

4.2.2 Anaglyphe par polarisation ou vectographe

Ce procédé est analogue au procédé utilisant des filtres colorés à ceci près que la séparation des images repose sur la polarisation de la lumière à $+45^\circ$ pour l'œil droit et à -45° pour l'œil gauche. Ce système a été breveté pour la projection d'images fixes avant 1900 [McKay, 1953], a été utilisé pour la première fois au cinéma dans les années 1950 par Arch Oboler et a été utilisé jusqu'en 1990 dans les cinémas IMAX. Chaque œil recevant une image au spectre complet, ce système offre un réalisme supérieur à celui offert par le système des filtres colorés mais il n'a jamais été largement adopté. En effet, des projecteurs spéciaux étant nécessaires, ce système n'était pas rentable pour un grand nombre de petits cinémas. Si ce système a l'avantage d'être passif, nécessitant uniquement le port de lunettes polarisées par le spectateur, la technique est difficile à mettre en œuvre dans un système de télévision.

4.2.3 Anaglyphe lenticulaire/intégré (autostéréoscopie)

Dans le système d'anaglyphe lenticulaire, deux images sont affichées simultanément dans des bandes verticales entrelacées. Un réseau lenticulaire à lentilles cylindriques placé sur l'écran focalise les deux images séparément à une distance voisine de l'écartement des yeux. Dans ce système, il faut bien placer sa tête pour obtenir l'effet stéréoscopique. Ne nécessitant pas le port de lunettes spéciales, ce système est dit autostéréoscopique.

4.3 Effet Pulfrich

Utilisant des lunettes avec un verre teinté (œil gauche) et un verre non teinté (œil droit), ce système repose sur le fait que le cerveau met plus de temps à recevoir l'image sombre. L'effet est principalement observé sur des images comportant des mouvements horizontaux, de gauche à droite dans le cas décrit. Le système a l'avantage d'être compatible avec les écrans monochromes mais a l'inconvénient de nécessiter des mouvements horizontaux dans l'image pour créer l'effet de relief. Aucune mise en œuvre commerciale de ce système n'est connue.

4.4 Multiplexage temporel

Ce système envoie séquentiellement les images à l'œil gauche et à l'œil droit. Ces images sont séparées pour le spectateur grâce à des lunettes actives dotées d'obturateurs alternatifs synchronisés, généralement de type LCD. Utilisé dans les cinémas IMAX depuis 1990, ce système est aussi utilisé dans des jeux informatiques et peut être utilisé pour la télévision. On peut toutefois observer un papillotement dans les images produites par cette technique en raison de la faible fréquence de rafraîchissement (12 images/s pour le cinéma standard, 12,5-15 images/s pour la télévision à entrelacement). La technique fonctionne nettement mieux aux fréquences de rafraîchissement plus élevées utilisées en balayage progressif.

5 Codage numérique des images stéréoscopiques et compatibilité monoscopique

Le codage d'une image différente pour chaque trame d'une image entrelacée ou pour chaque trame d'une image à balayage progressif pose des problèmes de réduction des données pour les systèmes de codage numérique. Comme l'image pour l'œil droit et l'image pour l'œil gauche peuvent être très différentes, en particulier pour les gros plans, la réduction des données découlant du codage de la différence entre les images est nettement amoindrie. Une reconfiguration de ces systèmes basée sur une séparation du signal en deux flux distincts (œil gauche et œil droit) permet toutefois d'obtenir une meilleure efficacité. Cette configuration, décrite dans le Rapport UIT-R BT.2017, a été ajoutée dans la norme de codage vidéo MPEG-2.

6 Formats de production stéréoscopique

Si la présentation stéréoscopique nécessite un système d'affichage spécial et, généralement, une certaine forme de multiplexage et de démultiplexage optique, ce multiplexage n'est pas intrinsèquement nécessaire pour la production stéréoscopique. Il suffit de saisir deux flux d'images simultanés avec la distance de séparation correcte. Il est relativement aisé de produire et de postproduire ces images distinctes, leur combinaison et leur codage pour le format de reproduction requis ayant lieu à l'étape de la présentation. Si la production de deux images distinctes peut nécessiter davantage d'équipements ou des équipements plus élaborés que l'enregistrement d'images anaglyphiques, elle est intrinsèquement plus souple et peut être utilisée pour plusieurs formats de reproduction si nécessaire. Si aucun format de reproduction standard n'est choisi pour la télévision stéréoscopique, il sera essentiel de conserver les pratiques de production de deux images distinctes. Heureusement, l'extension MVP MPEG-2 (voir le Rapport UIT-R BT.2017) permet de coder le signal de cette manière. Des formats de production équivalents seront également nécessaires. Si ces formats doivent être pris en charge dans la largeur de bande des équipements existants, il faudra peut-être tolérer une certaine baisse de la qualité d'image.

7 Conclusion

Correctement mise en œuvre, la stéréoscopie offre aux spectateurs une restitution améliorée des images, ce qui leur permet de se sentir davantage concernés, de voir des images plus réalistes et, potentiellement, d'être plus satisfaits. A cet égard, cette technique a beaucoup de points en commun avec la technique du son d'ambiance, qui a amélioré les conditions d'écoute aussi bien au cinéma qu'à la télévision.

Grâce aux progrès techniques récents, en particulier dans le domaine des écrans et du codage numérique, on se rapproche à grands pas d'une mise en œuvre pratique à grande échelle de la télévision stéréoscopique. A cet égard aussi, l'imagerie stéréoscopique a beaucoup de points en commun avec la technique du son d'ambiance, qui a été largement adoptée depuis la mise en œuvre de la radiodiffusion numérique.

En termes d'imagerie, la stéréoscopie constitue le prochain défi important pour les chercheurs, les développeurs, les fabricants et les radiodiffuseurs, maintenant que la télédiffusion numérique monoscopique est bien établie. De nombreux efforts sont encore nécessaires pour définir et normaliser les formats de production et les formats de distribution pour cette nouvelle technique.

Plus précisément, les domaines dans lesquels l'UIT-R doit actuellement œuvrer sont les suivants:

- déterminer si un format d'affichage stéréoscopique commun est nécessaire ou souhaitable et, si c'est le cas, définir des critères quantitatifs et qualitatifs d'évaluation et de sélection;
- établir des formats de production stéréoscopique standards pour faciliter l'échange et la distribution des programmes;
- spécifier les caractéristiques souhaitables et les normes de qualité de fonctionnement des équipements de production stéréoscopique;
- définir les pratiques de production stéréoscopique recommandées;
- définir les normes de qualité stéréoscopique et les procédures de contrôle de la qualité;
- déterminer si les systèmes d'émission de télévision stéréoscopique seront plus sensibles que les systèmes d'émission monoscopique à l'intensité des signaux, au brouillage, à la topographie ou à d'autres facteurs liés aux émissions susceptibles d'avoir une incidence sur la qualité de fonctionnement d'ensemble du système.

8 Références et bibliographie

La littérature sur le sujet est très abondante. Les références et la bibliographie ci-dessous sont loin d'être exhaustives, mais elles peuvent servir de point de départ pour ceux qui souhaitent obtenir davantage d'informations.

Références générales

WOODS, DOCHERTY et KOCH [1991] The use of flicker-free television products for stereoscopic display applications in *Stereoscopic Displays and Applications II*, J. Merritt, S. Fisher, editors, Proceedings of SPIE Vol. 1457, 25-27 février 1991, San Jose, Californie, Etats-Unis d'Amérique.

MCKAY, H.C., [1953] *Three-dimensional photography: principles of stereography*: American Photographic Publishing Company 1953. Republished online at the Stereoscopic Displays Conference website <http://www.stereoscopic.org>.

BENTON, S.A. ed, [Mai 2001] *Selected Papers on Three-Dimensional Displays* SPIE.

Proceedings of the SPIE – Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems – 13 vols to date.

References on Pulfrich effect from http://www.siu.edu/~pulfrich/Pulfrich_Pages/lit_pulf/1_pulf.html.

- PULFRICH, C. [Juin-septembre, 1922] Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie. *Die Naturwissenschaften*, **10**: Heft 25, p. 553-564; Heft 26, p. 569-574; Heft 27, p. 596-601; Heft 33, p. 714-722; Heft 34, p. 735-743; Heft 35, p. 751-761.
- LYTHGOE, R.J. [1938] Some Observations on the Rotating Pendulum. *Nature*, **141** (March 12 issue), 474.
- LIT, A. [1949] The magnitude of the Pulfrich stereophenomenon as a function of binocular differences of intensity at various levels of illumination. *American Journal of Psychology*, **62**, 159-181.
- LIT, A. et HYMAN, A. [1951] The Magnitude of the Pulfrich Stereophenomenon as a Function of Distance of Observation. *American Journal of Optometry and Archives of the American Academy of Optometry*, **Monograph No. 122**, 1-17.
- LIT, A. [1960a] Magnitude of the Pulfrich stereophenomenon as a function of target thickness. *Journal of the Optical Society of America*, **50**, 321-327.
- LIT, A. [1960b] Magnitude of the Pulfrich stereophenomenon as a function of target velocity. *Journal of Experimental Psychology*, **59**(3), 165-175.
- ALPERN, M. [1968] A Note on Visual Latency. *Psychological Review*, **75**, 260-264.
- CHRISTIANSON, S. et HOFSTETTER, H.W. [1972] Some Historical Notes on Carl Pulfrich. *American Journal of Optometry and Archives of the American Academy of Optometry*, **49**, 944-947.
- RUSHTON, D. [1975] Use of the Pulfrich Pendulum for Detecting Abnormal Delay in the Visual Pathway in Multiple Sclerosis. *Brain*, **98** (Part II), 283-296.
- BRAUNER, J.D. et LIT, A. [1976] The Pulfrich effect, simple reaction time, and intensity discrimination. *American Journal of Psychology*, **89**(1), 105-114.
- NICKALLS, R.W.D. [1986] Nickalls' Theorem and the Pulfrich Illusion. *The Mathematical Gazette*, and related works SMPTE Journal 1991-2000.
- HARRIS, SHAW, DEAN, HENDRIKS, OMIDVAR, MURRAY, et BAKER [Octobre, 1994] 3-D for the Nineties-A Wide-Field Stereo IMAX® Camera, 103:648.
- HIRUMA et FUKUDA [Décembre, 1993] Accommodation Response to Binocular Stereoscopic TV Images and Their Viewing Conditions, 102:1137.
- LIPTON [Mai 1991] The Evolution of Electronic Stereoscopic, 100:332.
- MAYHEW [Juin 1991] Vision III Single-Camera Autostereoscopic Methods, 100:416.
- MAYHEW [Juin 1993] A 35mm Autostereoscopic System for Live-Action Imaging Using a Single Camera and Lens, 102:505.
- MAYHEW et HALLOWS [Septembre 1993] On Usage of the Word Stereoscopic, Re: A 35mm Autostereoscopic System for Live Action Imaging Using a Single Camera and Lens, (June 1993 SMPTE Journal, p. 505-511), 104:826, (Letter).
- YAMANOUE [Avril 1997] The Relation Between Size Distortion and Shooting Conditions for Stereoscopic Images, 106:225.
- YANO et YUYAMA [Janvier 1991] Stereoscopic HDTV: Experimental System and Psychological Effects, 100:14.

Références extraites des précédents Rapports de l'UIT-R:

- HIRUMA, N. et FUKUDA, T. [Décembre, 1990] Accommodation response to binocular stereoscopic TV images and their viewing conditions. *J. SMPTE*, 102, 12, p. 2047-2054.
- YAMANOUE, H. *et al.* [Octobre, 1997] Subjective study on the orthostereoscopic conditions for 3D-HDTV. ITE Tech. Report, Vol. 21, **63**, p. 7-12.
- YAMANOUE, H. *et al.* [1998] Orthostereoscopic conditions for 3-D HDTV. Proc. SPIE, 3295, Stereoscopic displays and Applications IV.

- BERTHOLD, A. [1997] The influence of blur on the perceived quality and sensation of depth of 2D and stereo images. ATR Human Information Processing Research Laboratories Technical Report, TR-H-232, Kyoto, Japon.
- JULESZ, B. [1971] Foundations of Cyclopean Perception. The University of Chicago Press, Chicago, IL Etats-Unis d'Amérique.
- PASTOOR, S. [1991] 3D-television: A survey of recent research results on subjective requirements, Signal Processing: Image Communication, 4(1), p. 21-32.
- PASTOOR, S., WÖPKING, M., FOURNIER, J. et ALPERT, T. [1995] Digital stereoscopic imaging & applications (DISTIMA): Human Factors Data, Deliverable ID: R2045/HHI/AT/DS/C/026/b1.
- PERKINS, M.G. [1992] Data compression of stereopairs. IEEE Trans. on Comm., 40(4), p. 684-696.
- STELMACH, L. et TAM, W. J. [1998] Stereoscopic image coding: effect of disparate image-quality in left- and right-eye views, Signal Processing: Image Communication, 14, p. 111-117.
-