

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Juillet 2014

Édition scientifique



anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique

Avis de l'Anses

Rapport d'expertise collective

Juillet 2014

Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 1^{er} juillet 2014

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,** **de l'environnement et du travail**

relatif aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont rendus publics.

L'Anses s'est auto-saisie le 9 décembre 2011 pour la réalisation de l'expertise suivante : « évaluation des effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds ».

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Ces dix dernières années ont vu le développement rapide de nouvelles technologies audiovisuelles en 3Ds (3D stéréoscopique¹). Après l'importante progression de l'offre de films en 3Ds au cinéma depuis le milieu des années 2000, on assiste aujourd'hui au développement de l'offre de téléviseurs, d'ordinateurs, de consoles de jeux et de téléphones mobiles équipés de technologies 3Ds. Les produits proposés utilisent des procédés qui n'impliquent plus nécessairement le port de lunettes spéciales, facilitant ainsi un large accès à ces technologies. Les systèmes audiovisuels en 3Ds trouvent aujourd'hui des applications aussi bien dans les secteurs domestiques que professionnels (simulateurs 3Ds par exemple).

Le développement de ces technologies 3Ds pose cependant la question de leur impact éventuel sur la santé et notamment sur la vision humaine. Plusieurs fabricants de dispositifs équipés de

¹ Le terme « 3D » (pour vision en trois dimensions) est ambigu lorsque l'on parle des technologies audiovisuelles (télévision 3D, cinéma 3D, etc.) car la perception tridimensionnelle est possible aussi en affichant la même image pour les deux yeux de l'observateur. Cette problématique est exposée en détail dans la partie 2 du rapport d'expertise « introduction à l'interfaçage visuel ». Si chaque œil de l'observateur voit une image différente de celle vue par l'autre œil, on parle alors d'interfaçage visuel stéréoscopique. Pour bien préciser cette solution technologique, c'est l'abréviation « 3Ds » et non 3D qui est utilisée dans les travaux d'expertise collective.

technologies 3Ds ont d'ailleurs émis des avertissements recommandant aux enfants ou aux populations souffrant de pathologies oculaires particulières d'éviter l'usage de ces produits.

Dans un courrier en date du 27 janvier 2011, l'association « Robin des bois » a saisi l'Anses afin que celle-ci émette un avis sur les risques sanitaires potentiellement induits par la console de jeux vidéo « Nintendo 3Ds ». L'Anses a répondu à l'association « Robin des bois », dans un avis daté du 13 juillet 2011, qu'une analyse préliminaire de la littérature existante ne permettait de se prononcer ni sur les risques sanitaires liés à l'utilisation de consoles de jeux 3Ds, ni sur un âge limite à partir duquel l'exposition aux images 3Ds des consoles de jeux n'affecterait pas le développement visuel de l'enfant.

Cependant, considérant

- que des études scientifiques suggèrent que, lors de la visualisation d'images en 3Ds, la fatigue visuelle apparaît plus vite et de manière plus intense qu'avec des images monoscopiques ;
- que les technologies 3Ds sont en constante évolution et que l'offre de matériel audiovisuel 3Ds, notamment destiné à un usage domestique, se développe rapidement ;
- que ces technologies peuvent être accessibles aux enfants dont le système visuel est en cours de développement ;
- que les populations qui peuvent être exposées aux différentes technologies 3Ds sont très diversifiées (enfants, population générale, travailleurs notamment) ;

l'Agence s'est auto-saisie le 9 décembre 2011, ainsi qu'elle l'avait annoncé dans son avis sur le sujet publié en juillet 2011, afin d'évaluer les risques sanitaires potentiels liés à l'usage des technologies audiovisuelles 3Ds.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Anses a confié l'expertise au groupe de travail « 3Ds ». Ce groupe de travail a été constitué, à la suite d'un appel à candidatures public ouvert du 19 décembre 2011 au 1^{er} février 2012, d'experts en ophtalmologie, en ophtalmologie pédiatrique, en orthoptie, en sciences cognitives et d'experts physiciens spécialistes des technologies 3Ds. Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

Le groupe de travail coordonné par l'Anses s'est réuni à 13 reprises en sessions plénières, du 16 avril 2012 au 16 janvier 2013. Le groupe de travail a par ailleurs sollicité l'audition d'experts scientifiques nationaux, internationaux et de représentants de fédérations et syndicats professionnels de la 3Ds afin d'obtenir toutes les informations pertinentes pour répondre à cette auto-saisine. Pour réaliser cette expertise, le groupe de travail s'est appuyé sur une large revue de la littérature scientifique internationale complétée par des auditions de personnalités scientifiques.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été présentés régulièrement au CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques, entre le 10 juillet 2012 et le 10 février 2014. Ils ont été adoptés par le CES le 28 mars 2014. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

L'analyse bibliographique entreprise par le groupe de travail « 3Ds » a été aussi exhaustive que possible. Les travaux scientifiques pris en compte dans le rapport sont principalement issus de publications dans des revues internationales à comité de lecture.

Afin d'évaluer les risques sanitaires potentiels des technologies 3Ds, les travaux d'expertise ont porté sur :

- les technologies 3Ds, à travers un état de l'art des technologies audiovisuelles existantes ;
- les mécanismes de la perception de l'environnement en 3Ds, y compris pour les enfants et les populations sensibles identifiées ;
- les effets sanitaires, à travers :
 - une analyse des travaux publiés concernant les effets sanitaires d'une exposition aux technologies audiovisuelles 3Ds ;
 - le recensement des différents dangers potentiels relatifs à une exposition aux technologies 3Ds ;
 - la caractérisation des différents modes d'exposition envisageables pour chaque technologie 3Ds ;
 - l'estimation des effets sanitaires potentiels, en décrivant les mécanismes biologiques associés, y compris pour les populations sensibles.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES ET DU GROUPE DE TRAVAIL

Après une introduction sur l'interfaçage visuel, le rapport d'expertise présente les bases physiologiques de la perception tridimensionnelle et notamment le développement visuomoteur chez l'enfant.

Le rapport expose ensuite l'état de l'art des technologies 3Ds et liste les principaux domaines d'usage de la 3Ds, sans toutefois être exhaustif. L'usage de la 3Ds dans des applications grand public étant récent, il n'existe pas encore, à la date de publication de ce rapport, d'enquête suffisamment convaincante fournissant des données chiffrées liées à l'usage de contenu en 3Ds (nombre d'utilisateurs, fréquence d'observation, âge des utilisateurs, domaines concernés, *etc.*) en comparaison notamment de l'usage de contenu monoscopique. Par ailleurs, cet état de l'art présente uniquement les dispositifs largement commercialisés. Les technologies en développement qui seront éventuellement utilisées dans le futur, comme par exemple celles basées sur l'holographie, ne sont notamment pas décrites.

Ce rapport présente les règles de conception de contenu 3Ds qui peuvent être appliquées pour améliorer le confort visuel dans les différents domaines d'usage. Ces règles de conception sont celles employées aujourd'hui par les professionnels en 3Ds ; elles n'ont pas été discutées et validées par le groupe de travail et ne peuvent être considérées comme préconisées par l'Anses. Ce rapport n'a pas pour objectif de présenter toutes les autres règles techniques ou artistiques utilisées en 3Ds pour la bonne réalisation d'un contenu en relief.

Enfin, les données disponibles sur les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique sont exposées.

La capacité à distinguer le monde réel d'un monde virtuel dans le développement psycho-visuel est une question importante en soi, mais n'entre pas dans le champ de l'auto-saisine. Les effets sanitaires (addiction, confusion réel-virtuel, *etc.*) d'une immersion dans un monde virtuel, non spécifiques aux technologies 3Ds, ne sont donc pas l'objet du rapport.

Le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective, objets du rapport d'expertise, lors de sa séance du 10 février 2014. Il a adopté les conclusions et recommandations formulées dans une synthèse d'expertise collective le 28 mars 2014 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Conclusions de l'expertise collective

La perception tridimensionnelle

La perception de l'espace en 3 dimensions fait intervenir différents facteurs. Un des facteurs les plus importants est la vision stéréoscopique, c'est-à-dire la perception de la profondeur et de la distance d'un objet résultant du chevauchement des champs de vision des deux yeux. Les yeux étant distants, en moyenne, de 65 mm l'un de l'autre chez l'adulte, chaque œil perçoit l'objet avec un angle de vue légèrement différent, ce qui produit des images rétiniennes différentes. Cette différence est exploitée par le cerveau qui fusionne ces deux images pour mieux percevoir l'objet en 3 dimensions.

Les différences individuelles

La qualité de la vision stéréoscopique est influencée dans les conditions physiologiques par un nombre important de caractéristiques individuelles : la distance interpupillaire, le diamètre pupillaire, le pouvoir de vergence, la relation entre l'accommodation et la vergence des yeux², l'âge, l'acuité visuelle de chaque œil, *etc.*

Une partie de la population possède une vision stéréoscopique déficiente, certaines personnes en étant même démunies du fait d'anomalies du système visuel. Une étude récente montre que lors de l'usage de technologies 3Ds, les personnes possédant une vision stéréoscopique déficiente présentent moins de symptômes que les personnes possédant une vision stéréoscopique normale [Kim *et al.*, 2013]³. D'après des rapports de l'Institut de la santé et de la recherche médicale (Inserm) et de la Haute autorité de santé (ex. Anaes) ([Inserm, 2002]⁴[Anaes, 2002]⁵) s'intéressant à la population française, 20 % des enfants de moins de 6 ans présenteraient une anomalie visuelle. Parmi ces anomalies, la plus fréquente est l'amblyopie unilatérale, pouvant entraver la vision stéréoscopique. Selon les études sur le sujet, 3 à 8 % de la population générale présenterait une amblyopie définitive qui correspond à un déficit visuel fonctionnel. Une revue récente de la littérature indique par ailleurs une prévalence de 5 à 33 % [Cooper et Jamal, 2012]⁶ pour les anomalies de la vergence. Dans la population active, la proportion d'individus présentant des anomalies de la vision stéréoscopique serait inférieure à ces chiffres, mais il n'existe aucune donnée épidémiologique concernant ces troubles.

2 Pour jauger le lien entre l'accommodation et la vergence chez une personne, on mesure le rapport « accommodation – vergence » (AC/A) qui donne la quantité de vergence accommodative pour une dioptrie d'accommodation.

3 Kim SH, Suh YW, Yun C, Yoo EJ, Yeom JH, Cho YA., Eye (Lond). *Influence of stereopsis and abnormal binocular vision on ocular and systemic discomfort while watching 3D television.* 2013 Nov;27(11):1243-8. doi: 10.1038/eye.2013.173. Epub 2013 Aug 9.

4 Inserm, 2002, Expertise collective, Déficiences visuelles : Dépistage et prise en charge chez le jeune enfant.

5 Anaes, 2002, Dépistage précoce des troubles de la fonction visuelle chez l'enfant pour prévenir l'amblyopie.

6 Cooper J, Jamal, N. *Convergence insufficiency--a major review*, 2012, American Optometric Association.

Le développement visuel de l'enfant

L'ensemble des publications portant sur le développement visuel chez l'enfant s'accordent sur le fait qu'il existe plusieurs phases de développement du système visuel. Il est cependant difficile de définir des âges précis encadrant ces phases.

Dans le développement normal, la croissance du globe oculaire est observée jusqu'à l'âge de 4 ans, âge auquel la taille du globe oculaire rejoint quasiment celle de l'adulte. Cependant, la maturation neuronale du système visuel se poursuit jusqu'à l'adolescence.

La vision binoculaire commence à se développer dès les premiers mois de vie, s'affine avec la maturation neuronale jusqu'à 10-11 ans et se poursuit jusqu'à la fin de la maturation fovéolaire entre 13 et 16 ans.

Ces données sont importantes car elles mettent en évidence l'existence d'une plasticité au-delà du simple développement de l'acuité visuelle, qui généralement est acquise à l'âge de 6 ans. Le tableau suivant présente les âges moyens des périodes de maturation du système visuel (Cf. Figure 1).

Tableau présentant les âges moyens des périodes de maturation du système visuel

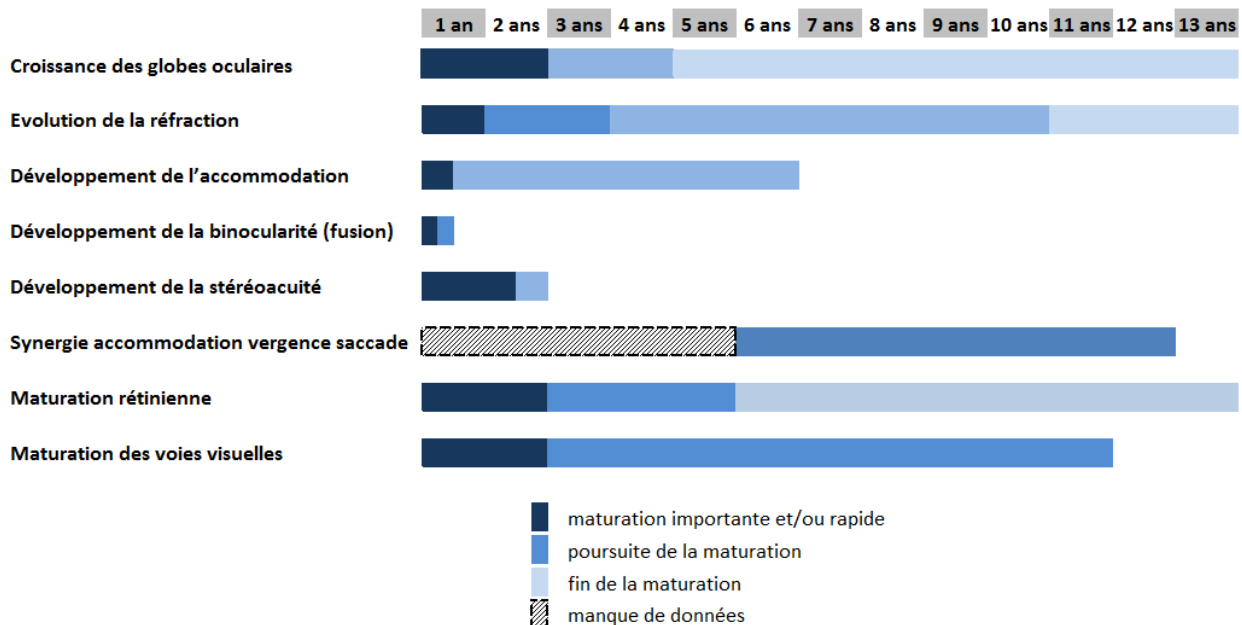


Figure 1 : Tableau présentant les âges moyens des périodes de maturation visuelle

Les bornes inférieures et supérieures des périodes de maturation visuelles (croissance des globes oculaires, évolution de la réfraction, développement de l'accommodation, *etc.*) fluctuent en fonction des enfants, notamment en cas d'antécédent de naissance prématurée. Lors de ces périodes dites sensibles, le système visuel de l'enfant serait le plus vulnérable, lorsque les stimulations extérieures sont les plus susceptibles d'interférer sur les étapes d'acquisition de la maturation (fonctionnelle ou anatomique) visuelle complète.

Les interfaces visuelles exploitant la vision stéréoscopique

Quelle que soit la technique employée dans les différentes interfaces visuelles stéréoscopiques, l'objectif est toujours le même : fournir à chaque œil une image différente. Pour ceci, il existe aujourd'hui deux procédés : soit on place près des yeux deux petits écrans (cas des visiocasques), soit on sépare techniquement les deux images affichées sur un seul écran (ou ensemble d'écrans).

Il existe ainsi 3 types d'interfaces visuelles en 3Ds :

- les visiocasques (ou vidéo-lunettes) ;

- les écrans auto-stéréoscopiques (écrans avec illumination, écrans à barrière de parallaxe, écrans avec réseau lenticulaire) ;
- les interfaces nécessitant le port de lunettes (procédé par filtrage colorimétrique, lunettes polarisantes, lunettes à obturation électronique).

Des contextes de visualisation très disparates

Les domaines d'applications des technologies audiovisuelles exploitant la vision stéréoscopique sont très variés, allant de certaines activités professionnelles très spécialisées aux loisirs grand public (cinéma, jeux vidéo, télévision, art, etc.).

Les supports des interfaces visuelles en 3Ds sont eux aussi très différents : écrans de cinéma, téléviseurs, écrans de tablette numérique, *smartphones*, consoles de jeux et visiocasques, correspondant à des conditions d'observation et d'usage très variables. Selon les domaines d'applications (domestiques ou professionnels) et selon les interfaces utilisées, les temps d'exposition aux systèmes 3Ds peuvent s'étaler de quelques instants à plusieurs heures (par exemple au cinéma ou dans le monde professionnel).

Les contraintes visuelles engendrées par les interfaces stéréoscopiques

En conditions naturelles, les yeux convergent⁷ et accommodent⁸ à la même distance, c'est-à-dire à la distance de l'objet observé dans le monde réel. Le principe technique de la restitution stéréoscopique (en 3Ds) ne permet pas de respecter ce principe physiologique. Si les yeux convergent bien à la distance perçue de l'objet virtuel, c'est en revanche toujours à l'endroit où sont affichées les images réelles, c'est-à-dire au niveau de l'écran, que l'accommodation se fait. L'accommodation et la vergence des yeux ne se font ainsi pas à la même distance. Ce conflit ainsi qu'un certain nombre d'autres incohérences font que les interfaces stéréoscopiques ne peuvent pas reproduire les conditions et les effets de la vision binoculaire naturelle. Les effets possibles du conflit accommodation-vergence sur les utilisateurs de ces interfaces doivent donc être étudiés, en matière de confort visuel et de risques sanitaires potentiels.

Il existe cependant une zone nommée « zone de confort » où, en dépit d'un conflit modéré entre accommodation et vergence, le confort visuel pour la vision stéréoscopique est assuré. Au-delà de cette zone, l'inconfort visuel apparaît, la fusion binoculaire y est plus difficile, voire impossible.

Qualité des contenus et des interfaces stéréoscopiques

Les contenus 3Ds (films, jeux, etc.) actuellement disponibles sur le marché sont de qualité très hétérogènes en matière de confort visuel offert aux observateurs. Par ailleurs, il n'existe pas à ce jour de réglementation garantissant l'adéquation des produits et des contenus 3Ds au respect des contraintes physiologiques de l'observateur. C'est la raison pour laquelle les différentes organisations professionnelles de la filière technique cinématographique et télévisuelle (Ficam, CST, UP3D, AFC, HD-Forum)⁹ ont produit un livre blanc¹⁰ dressant l'état des lieux des techniques audiovisuelles de restitution du relief. Ce document présente un état de l'art de la création de contenu, de la diffusion d'images et des aspects physiologiques associés. Il met en évidence l'existence de difficultés techniques liées à la réalisation de contenu 3D stéréoscopique de qualité en matière de confort visuel.

Au niveau international, le consortium international *3D@home*¹¹, qui regroupe principalement des acteurs commerciaux et industriels de la 3Ds, se penche également sur la création de contenus

⁷ Les deux yeux sont orientés vers le même « objet ».

⁸ Le cristallin de chaque œil se déforme pour assurer la vision nette.

⁹ Ficam, CST, UP3D, AFC : cf. liste des abréviations dans le rapport d'expertise collective.

¹⁰ « Le Livre Blanc du Relief (3Ds) au cinéma et à la télévision », http://www.dig-it.fr/wp-content/uploads/downloads/2012/05/LivreBlancReliefV2_BasseDef1.pdf

¹¹ <http://www.3dathome.org/>

3Ds de qualité, ainsi que sur les facteurs humains correspondants. Plusieurs entreprises fournissent des labels de qualité de films en relief.

Estimation des effets sanitaires des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique (3Ds)

En analysant la littérature scientifique disponible, le groupe de travail a identifié différents effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux interfaces audiovisuelles en 3Ds, l'effet le plus important étant la fatigue visuelle.

Les risques sanitaires identifiés liés aux interfaces visuelles en 3Ds sont très dépendants des capacités visuelles de l'observateur (différences individuelles importantes) ainsi que de la qualité technologique des interfaces audiovisuelles 3Ds et des contenus utilisés.

Les différentes technologies stéréoscopiques (avec lunettes) et auto-stéréoscopiques (sans lunettes) ne changent pas le problème de fond (conflit accommodation-vergence). Il faut cependant noter que de nouvelles technologies se développent (holoscopie et holographie) qui ont le potentiel de supprimer le conflit accommodation-vergence [Kovacs et Balogh, 2013]¹².

La fatigue visuelle

Une cause importante de fatigue visuelle, associée à une exposition aux interfaces audiovisuelles en 3Ds, est liée au « conflit accommodation-vergence ».

Les symptômes de cette fatigue visuelle sont :

- l'asthénopie accommodative (fatigue et douleurs péri-oculaires) ;
- la sensation d'œil sec, les troubles de la vision (diplopie, une sensibilité réduite aux contrastes spatiaux, une diminution de l'acuité visuelle et de la rapidité de perception) ;
- les troubles extra-oculaires (comme les maux de tête, les douleurs au cou, les maux de dos et aux épaules, des baisses de performances dans les activités mentales, des pertes de concentration).

Les autres effets

D'autres effets sanitaires peuvent potentiellement apparaître, notamment des effets liés à l'équilibre postural (vertiges) ou des effets liés à l'appréciation du réel (altération de la perception de l'environnement). Ces effets liés à une exposition aux interfaces 3Ds restent encore mal étudiés, mais pourraient générer un risque accidentel ponctuel lié aux vertiges.

L'interaction entre le conflit sensori-moteur accommodation-vergence et l'engagement émotionnel du spectateur lié à l'esthétisme des technologies 3Ds n'est par ailleurs pas connue.

¹² Kovacs P. T. and Balogh T, *3D Light-Field Display Technologies*, in F. Dufaux, B. Pesquet-Popescu and M. Cagnazzo, editors, *Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering*, Wiley, 2013.

Populations potentiellement à risque

Pendant l'enfance et jusqu'à l'adolescence, le couplage physiologique « accommodation-vergence » poursuit sa maturation. Certaines recherches [Kapoula *et al.*, 2012]¹³ suggèrent que l'exposition à des conflits accommodation-vergence de faible amplitude chez des enfants de 13 à 17 ans peut être plus perturbatrice que l'exposition à des conflits d'amplitude plus importante. Les personnes sujettes à des troubles infra-cliniques spécifiques (déficits vestibulaires, hétérophorie, insuffisance de vergence, strabisme accommodatif, *etc.*) peuvent faire partie des populations à risque, car elles pourraient présenter un seuil de tolérance plus bas au conflit accommodation-vergence.

Exposition des populations

Il n'existe pas à ce jour de données publiées permettant de caractériser l'exposition de la population aux technologies audiovisuelles en 3Ds. Cependant, des études récentes de l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) montrent que l'exposition de la population à la télévision et aux jeux vidéo peut atteindre plusieurs heures par jour. De ce fait, il est possible que ces niveaux d'exposition se transposent partiellement, dans les années qui viennent, aux technologies en 3Ds. Le développement des interfaces dans le domaine des loisirs laisse donc présager d'une augmentation potentiellement forte du temps d'exposition, notamment chez les plus jeunes.

Il existe des systèmes de conversion dits 2D/3D qui transforment un contenu monoscopique en un contenu stéréoscopique, par des algorithmes plus ou moins automatiques et plus ou moins performants. Pour ce qui concerne le cinéma, des films réalisés en monoscopique ont été convertis en 3Ds, généralement avec une intervention manuelle. Pour ce qui concerne les écrans 3Ds, il est maintenant possible pour le téléspectateur de transformer à volonté un contenu 2D en un contenu 3Ds, en faisant qui plus est varier la quantité de parallaxe.

Ces évolutions ouvrent la possibilité d'une augmentation potentiellement forte (temps d'exposition) et non contrôlée (quantité de parallaxe horizontale et qualité de l'expérience 3D liée au contenu converti) de l'exposition à la 3Ds.

Avec le développement et l'exploitation des technologies 3Ds, les populations professionnelles peuvent être amenées elles aussi à être plus exposées. Les durées d'exposition pourraient néanmoins être mieux contrôlées dans ces domaines et les effets potentiels mieux suivis que dans le grand public.

Recommandations du CES

En matière d'études et de recherche

Les technologies stéréoscopiques génèrent un conflit entre les processus d'accommodation et de vergence. Les effets sanitaires de l'exposition à de telles technologies n'ont été que partiellement étudiés chez l'adulte et rarement chez l'enfant. Les études menées jusqu'à présent sont basées sur une évaluation orthoptique fournissant des mesures de nature qualitative. Dans ce domaine, la dynamique physiologique de la motricité oculaire ainsi que les synergies entre vergence, accommodation et saccades restent inexplorées.

¹³ Kapoula Z., Gaertner C., Matheron, E., *Spherical lenses and prisms lead to postural instability in both dyslexic and non dyslexic adolescents*. Plos one, 2012, 7(11)

Données sur l'exposition

Compte tenu du manque de données concernant l'exposition de la population aux technologies 3Ds, le CES recommande d'identifier les usages de la 3Ds ainsi que les populations concernées, de mieux caractériser les expositions des différentes populations exposées aux technologies 3Ds (adultes, enfants et adolescents et utilisateurs professionnels) et de mettre en place un suivi des expositions.

Études cliniques et physiologiques

Afin notamment d'améliorer la qualité des travaux portant sur l'étude des effets sanitaires des technologies 3Ds, le CES recommande de développer et valider des méthodes d'évaluation de la fatigue visuelle (construction de scores).

Compte tenu du manque de données, le CES recommande que des recherches soient encouragées pour :

- approfondir la connaissance du développement des systèmes binoculaires visuel et visuo-moteur de l'enfant et du maintien et vieillissement du fonctionnement de ces systèmes binoculaires à l'âge adulte ;
- quantifier les altérations éventuelles du système visuo-moteur (saccade, accommodation, vergence et synergie entre ces composantes) pendant et après la visualisation de contenus stéréoscopiques *versus* monoscopiques ;
- étudier les conséquences à long terme des expositions à la 3Ds sur la vision à tous les âges de la vie : une exposition unique prolongée peut-elle notamment entraîner une décompensation permanente de la synergie accommodation-vergence ou des déséquilibres posturaux dans le cas d'un terrain fragile ?
- étudier les conséquences psychologiques liées spécifiquement à la 3Ds (engagement émotionnel dans le cadre des loisirs, effet immersif, *etc.*) ;
- explorer les effets d'une exposition à la 3Ds sur le système vestibulaire, l'équilibre et le contrôle postural et la marche.

Il est souhaitable que ces études soient menées suivant une approche pluridisciplinaire engageant des compétences en création 3Ds, en oculomotricité binoculaire, en psychophysique de la vision, en orthoptie, en ophtalmologie, en oto-rhino-laryngologie et en posturologie.

De même, il y aurait un intérêt à réaliser de telles études chez diverses populations saines et sensibles (enfants ou adultes avec troubles oculomoteurs ou troubles d'équilibre).

Études épidémiologiques

Compte tenu du manque de données concernant la caractérisation de la vision binoculaire dans la population générale, le CES recommande la mise en œuvre de travaux épidémiologiques pour évaluer, dans différentes tranches d'âge, la qualité de la vision binoculaire et la prévalence des troubles potentiels : insuffisance de convergence, anisométrie, phorie, amblyopie, microstrabisme, troubles de l'équilibre en l'absence de pathologies vestibulaires, qualité de la vision binoculaire chez la personne âgée incluant les personnes sujettes à des chutes en l'absence de pathologie identifiée, *etc.*

En particulier, ces travaux devraient permettre d'évaluer et d'étudier les conséquences à long terme des expositions à la 3Ds sur la vision à tous les âges de la vie, notamment si le fait de ressentir de manière répétée des effets transitoires à court terme engendre des effets sanitaires permanents.

En matière d'information sur les expositions

Le CES recommande d'informer les utilisateurs que les individus n'ont pas la même sensibilité face aux technologies audiovisuelles 3Ds. Les différences individuelles pouvant expliquer des réactions différentes sont nombreuses : âge, qualité de la vision stéréoscopique, présence d'autres pathologies visuelles, etc. La durée et la fréquence des expositions doivent également être considérées pour apprécier les effets potentiels, notamment pour les enfants, adolescents et les utilisateurs professionnels.

Pour la population générale :

Deux types d'exposition peuvent être distingués : jeux vidéo et télévision 3Ds au quotidien d'une part, et cinéma 3Ds d'autre part.

La fatigue visuelle pouvant apparaître lors de la visualisation de contenu 3Ds est liée dans sa majeure partie au conflit accommodation-vergence inhérent aux interfaces 3Ds. Les symptômes liés à cette fatigue visuelle sont nombreux et variés : maux de tête, fatigue oculaire, yeux rouges, etc. En l'état actuel des connaissances et compte tenu des niveaux d'exposition constatés aujourd'hui, ces symptômes semblent être transitoires.

Le CES recommande que les personnes ressentant des symptômes lors de l'exposition à des interfaces 3Ds limitent alors leur temps d'exposition et invite ces mêmes personnes à consulter des professionnels de la santé visuelle afin de dépister d'éventuelles pathologies visuelles.

Le CES recommande que les professionnels de la 3Ds et les pouvoirs publics mettent à disposition des utilisateurs l'information sur les symptômes potentiellement ressentis et les conditions d'exposition recommandées pour les éviter, en fonction des différentes interfaces (cinéma, télévision, consoles de jeux etc.).

D'une manière générale, il est conseillé pour tout utilisateur de téléviseur 3Ds ou de console de jeux 3Ds de respecter les recommandations données par les constructeurs des dispositifs 3Ds¹⁴. Il est recommandé que les utilisateurs gardent leurs corrections optiques pendant la visualisation de contenus 3Ds.

En particulier, pour un spectateur ressentant de l'inconfort visuel en regardant des images stéréoscopiques (cinéma ou télévision), il est recommandé de ne pas se positionner trop proche de l'écran 3Ds. En effet, plus le spectateur est éloigné de l'écran stéréoscopique, moins il subit de contraintes sur son système visuel.

Par ailleurs, notamment dans le cas de certaines technologies de visualisation sans lunettes (écrans auto-stéréoscopiques de téléviseurs 3Ds ou de consoles de jeux 3Ds), la distance entre l'écran et l'observateur est fixe. Il est cependant possible de faire varier la parallaxe horizontale absolue du couple d'images stéréoscopiques, et ainsi de faire varier l'effet de profondeur : il est dans ce cas recommandé pour un spectateur ressentant de l'inconfort visuel de diminuer l'effet de relief (parallaxe horizontale).

Le CES tient par ailleurs à alerter le public que la survenue de symptômes après une exposition aux technologies 3Ds pourrait être accidentogène (par exemple reprise de la conduite dans un état non adapté).

En complément, le CES estime pertinent que des organismes publics vulgarisent, par exemple sur un portail internet à vocation pédagogique, le principe de la vision binoculaire, les principes de fonctionnement des technologies 3Ds et les effets sanitaires potentiels, notamment ceux liés au conflit accommodation-vergence.

14 des recommandations spécifiques détaillées sont fournies dans le chapitre 5.2 du rapport d'expertise collective produit par le groupe de travail « 3Ds ».

Pour les enfants et les adolescents

Compte tenu des âges clef dans le développement du système visuel déterminés par le groupe de travail « 3Ds », le CES recommande :

- de ne pas exposer les enfants de moins de 6 ans¹⁵ aux technologies 3Ds ;
- de limiter l'exposition des moins de 13 ans et d'être attentif aux éventuels symptômes induits.

Par ailleurs, le CES incite à sensibiliser les professionnels médicaux et paramédicaux de la petite enfance et les ophtalmologistes sur les mécanismes mis en jeu lors de la visualisation d'interfaces 3Ds, afin qu'ils puissent informer les parents sur les symptômes et risques potentiels.

Pour les populations professionnelles

Compte tenu du développement potentiel des technologies 3Ds dans le monde du travail, le CES recommande aux services de santé au travail et aux comités d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT) :

- d'informer les employeurs et les salariés des mécanismes mis en jeu lors de la visualisation d'interfaces 3Ds et des risques potentiels associés, pour éviter la survenue d'éventuels effets sanitaires ;
- d'effectuer un suivi des salariés exposés et une adaptation du poste de travail si nécessaire.

Pour les professionnels de la 3Ds (stéréographes, producteurs de film, etc.)

Le CES recommande aux professionnels de respecter, notamment auprès du public, la terminologie appropriée aux technologies utilisant la vision stéréoscopique : technologies 3D stéréoscopique ou en abrégé « 3Ds » et non « 3D », afin d'éviter la confusion avec la représentation tridimensionnelle monoscopique.

Le CES recommande aux professionnels d'informer le public du risque d'inconfort visuel (conflit accommodation – vergence) lié à l'usage des technologies 3Ds et les moyens d'y remédier.

Dans l'objectif de limiter la fatigue visuelle, le CES recommande de prendre en compte notamment les facteurs suivants lors de la création de contenu 3Ds :

- limitation de la disparité rétinienne en amplitude, en variation et en durée ;
- minimisation de la parallaxe verticale, des effets de bords d'écran, des différences chromatiques inter-vues en fonction des fréquences spatiales des images (flou des images), etc.

Il est à noter que la limitation de la disparité rétinienne de l'observateur revient à limiter la parallaxe horizontale angulaire. Cette dernière dépend de la parallaxe horizontale absolue (distance sur l'écran de deux points homologues du couple d'images stéréoscopiques) et de la distance de l'observateur à l'écran. Si cette dernière est variable, il faut considérer le cas le plus défavorable.

D'une manière générale, le CES suggère que les professionnels des technologies 3Ds suivent les recommandations techniques émises par les groupes et *consortia* de professionnels visant à produire des contenus audiovisuels de qualité.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence reprend les conclusions et recommandations exposées par le CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » au paragraphe 3, et souligne particulièrement les éléments ci-dessous.

¹⁵ à l'exception des méthodes thérapeutiques sous contrôle médical.

Considérant :

- le manque de données concernant la caractérisation de la vision binoculaire dans la population générale d'une part et le temps d'exposition aux technologies 3D stéréoscopiques d'autre part, notamment parmi les plus jeunes ;
- l'incertitude sur le développement et la diffusion, potentiellement forts, des technologies 3Ds dans les années futures, pour des usages grand public et en milieu de travail ;
- les différences individuelles importantes de qualité de la vision stéréoscopique dans la population ;
- l'existence, dans la vision au moyen d'interfaces 3D stéréoscopiques, d'un conflit entre l'accommodation et la vergence ;
- les phases de développement et de maturation neuronale du système visuo-moteur, et notamment de la vision binoculaire chez les enfants et adolescents, qui commencent dès les premiers mois de la vie et se poursuivent jusqu'à un âge compris entre 13 et 16 ans ;
- la mise en évidence dans la littérature scientifique de liens entre l'exposition aux technologies 3D stéréoscopiques et la fatigue visuelle ;

l'Agence recommande :

en matière de recherche

- de mieux caractériser et suivre les expositions aux technologies 3Ds en population générale et en milieu de travail ;
- de développer et valider des méthodes d'évaluation de la fatigue visuelle (construction de scores) ;
- de quantifier les altérations éventuelles du système visuo-moteur pendant et après la visualisation de contenus stéréoscopiques *versus* monoscopiques ;
- d'explorer les effets d'une exposition à la 3Ds sur le système vestibulaire, l'équilibre et le contrôle postural et la marche ;
- la mise en œuvre d'études épidémiologiques pour évaluer et étudier les conséquences à long terme des expositions à la 3Ds sur la vision aux différents âges de la vie, en particulier la qualité de la vision binoculaire et la prévalence de troubles potentiels : insuffisance de convergence, anisométrie, phorie, amblyopie, micro-strabisme, troubles de l'équilibre en l'absence de pathologies vestibulaires, qualité de la vision binoculaire chez la personne âgée incluant les personnes sujettes à des chutes en l'absence de pathologie identifiée, *etc.* ;
- d'étudier les conséquences psychologiques liées spécifiquement à la 3Ds (engagement émotionnel dans le cadre des loisirs, effet immersif, *etc.*) ;

concernant l'exposition aux technologies 3Ds

- que les enfants de moins de 6 ans ne soient pas exposés aux technologies 3D stéréoscopiques ;
- que les enfants et adolescents de moins de 13 ans aient un usage modéré des technologies 3Ds, et qu'ils soient, ainsi que leurs parents, attentifs aux éventuels symptômes induits ;

En complément, l'Agence indique qu'il est possible de limiter la fatigue visuelle ou d'autres symptômes chez les utilisateurs de technologies 3D stéréoscopiques dans la population générale en diminuant l'impression de relief (par exemple en s'éloignant de l'écran de cinéma ou en réduisant la quantité de relief sur un téléviseur) ou en limitant le temps d'exposition.

Marc Mortureux

MOTS-CLES

3D stéréoscopique, 3Ds, vision binoculaire, conflit « accommodation-vergence », fatigue visuelle, développement visuel.

Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique « 3Ds »

Auto-saisine n° 2011-SA-0334

RAPPORT d'expertise collective

**Comité d'experts spécialisé
« Agents Physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »**

Groupe de travail « Technologies 3Ds »

Janvier 2014

Mots clés :

3D stéréoscopique, 3Ds, vision binoculaire, conflit « accommodation-vergence », fatigue visuelle, développement visuel

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GRUPE DE TRAVAIL « TECHNOLOGIES 3Ds »

Présidente

Francine BEHAR-COHEN – Directeur médical de l'hôpital ophtalmique Jules-Gonin à Lausanne, Suisse, Directeur de recherche, équipe Inserm « Physiopathologie des maladies oculaires: Innovations thérapeutiques », équipe 17 de l'UMRS 872 au Centre de recherche des Cordeliers à Paris, Professeur des Universités en ophtalmologie et spécialiste des maladies de la rétine, Praticien Hospitalier.

Vice-président

Philippe FUCHS – Professeur à Mines ParisTech – Technologies stéréoscopiques, réalité virtuelle et réalité augmentée.

Membres

Dominique BREMOND-GIGNAC – Professeur des Universités en Ophtalmologie - Praticien Hospitalier Chef de service CHU d'Amiens – spécialiste en Ophtalmologie pédiatrique, Chercheur associé CNRS FR3636 Vision binoculaire et oculomotricité, (Fédération de recherche en neurosciences des Saints-Pères) Université Paris V René Descartes.

Frédéric DUFAUX – Directeur de recherche, Télécom ParisTech, CNRS – Technologies 3D, aspects normatifs 3D.

Fabienne JONQUA – Orthoptiste libéral et attaché au service d'Ophtalmologie du CHU d'Amiens.

Zoï KAPOULA – Directeur de recherche – CNRS FR 3636 (Fédération de recherche en neurosciences des Saints-Pères), Université Paris V Descartes – Equipe Physiopathologie de la vision et motricité binoculaire.

Mohamed-Chaker LARABI – Enseignant-chercheur, Université de Poitiers, XLIM CNRS UMR 7252 – Étude et modélisation de la vision binoculaire humaine.

Christophe ORSSAUD – Praticien Hospitalier, Ophtalmologiste et neurologue, Responsable de l'Unité Fonctionnelle d'Ophtalmologie, HEGP (Hôpital européen Georges Pompidou). Equipe Physiopathologie de la vision et motricité binoculaire, Université Paris V René Descartes.

Anne-Lise PARADIS – Chargée de recherche, CNRS (UMR 8246) - Inserm-UPMC (Neurosciences Paris Seine) – Sciences cognitives, neurophysiologie de la perception.

COMITE D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements ».

Mandat 2011-2013

Présidente

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Membres

Francine BEHAR-COHEN – Ophthalmologiste praticienne, Directeur de recherche à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Jean-Marc BERTHO – Chercheur / Expert en radiobiologie au laboratoire de radiotoxicologie expérimentale de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN).

Jean-Pierre CÉSARINI – Retraité (Directeur du laboratoire de recherche sur les tumeurs de la peau humaine, fondation A. de Rothschild et Inserm).

Frédéric COUTURIER – Ingénieur, Responsable du département « Études » à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR).

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Aïcha EL KHATIB – Chargée de mission à l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris - Hôpital Avicenne.

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Eric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (CNES).

Philippe LEPOUTRE – Ingénieur acousticien, Responsable du pôle technique de l'Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (Acnusa).

Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Alain MUZET – Retraité CNRS, médecin, spécialiste du sommeil et de la vigilance.

Yves SICARD – Maître de conférences à l'Université Josef Fourier, Conseiller Scientifique au Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies alternatives (CEA).

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

Mandat 2014-2016

Présidente

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Membres

Laurent BEUGNET – Médecin du travail, RATP.

Alexandre BOUNOUH – Chef de projet / Ingénieur de recherche au Laboratoire national d'essais (LNE).

Pierre CAMPO – Chercheur, Institut de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS).

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Eric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Claude GRONFIER – Chercheur, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (Cnes).

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire, Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

Dina ATTIA – Chef de projets scientifiques, unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques, Anses.

Olivier MERCKEL – Chef de l'unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques, Anses.

Secrétariat administratif

Sophia SADDOKI – Assistante, Direction de l'évaluation des risques, Anses.

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Corinne ROUMES, Institut de recherches biomédicales des armées (IRBA), Perception tridimensionnelle des éléments de l'espace.

Laurence VAIVRE-DOURET, CHU Cochin Port-Royal, unité 669 Inserm (neuro-développement des troubles de l'apprentissage, Necker).

François VITAL-DURAND, Directeur de recherche Inserm, Unité 846.

Thierry BOREL, Technicolor, *3D Excellence Programme*.

Jean-Louis de BOUGRENET de la TOCNAYE et Stéphanie FERRAGUT, Observatoire 3DFovéa (Télécom Bretagne, CHU Brest, unité 1101 Inserm).

Ficam (Fédération des industries du cinéma, de l'audiovisuel et du multimédia) représentée par Marc BOURHIS, Yves PUPULIN (Binocle) et Tommaso VERGALLO (Digimage).

UP3D (Union des professionnels de la 3D stéréoscopique) représentée par son président Sylvain GRAIN et Laurent VERDUCCI.

Consortium *3D Consumer* représenté par Bernard MENDIBURU et Pierre MICHEA.

Yves TROTTER, Centre de recherche « Cerveau et Cognition », équipe « Espace et contexte 3D ».

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions	10
Sigles et abréviations	22
Liste des tableaux	22
Liste des figures	22
1 Contexte, objet et modalités de traitement de l'auto-saisine	25
1.1 Contexte	25
1.2 Objet de l'auto-saisine	26
1.3 Modalités de traitement :	26
2 Introduction sur l'interfaçage visuel	28
3 Bases physiologiques de la perception tridimensionnelle	30
3.1 La vision humaine	30
3.1.1 Physiologie de la vision.....	30
3.1.1.1 Introduction	30
3.1.1.2 Rappels sur l'anatomie de l'œil humain :	31
3.1.1.3 Le cristallin :	32
3.1.1.4 La rétine	32
3.1.2 L'accommodation	33
3.1.2.1 Mécanismes optiques permettant de jouer sur la distance.....	33
3.1.2.2 Accommodation au sens strict :	34
3.1.3 Notions de champ du regard et champ visuel	36
3.1.3.1 Champ visuel monoculaire	36
3.1.3.2 Champ visuel binoculaire	36
3.1.3.3 Champ oculomoteur	37
3.1.3.4 Champ du regard	37
3.2 Perception de l'environnement naturel en trois dimensions	37
3.2.1 Perception de la profondeur par indices monoculaires	37
3.2.1.1 Ombres et lumière.....	37
3.2.1.2 Dimensions relatives	37
3.2.1.3 Hauteur relative dans le champ de vue	38
3.2.1.4 Interposition ou occultation.....	38
3.2.1.5 Gradient de la texture d'une surface	38
3.2.1.6 Variation de visibilité dans une scène extérieure.....	39
3.2.1.7 Parallaxe due aux mouvements	39
3.2.1.8 Perspective	40
3.2.2 Accommodation du cristallin pour la vision stéréoscopique	41
3.2.3 Perception de la profondeur en vision binoculaire.....	41
3.2.3.1 Introduction	41
3.2.3.2 Intérêt et pré-requis de la vision binoculaire	42
3.2.3.3 Vision binoculaire	43
3.2.3.4 Vision du relief et stéréoscopie.....	47
3.2.3.5 Mécanismes moteurs soutenant la vision binoculaire	49
3.2.3.6 Schéma récapitulatif des indices permettant la perception de la profondeur de l'espace tridimensionnel. ...	55

3.3 Développement visuomoteur chez l'enfant (développement visuel et perception spatiale).....	55
3.3.1 Développement visuel normal	56
3.3.2 Développement de la vision binoculaire	57
3.3.3 Récapitulatif des âges clef du développement visuel	57
3.3.4 Développement visuel anormal	60
3.3.4.1 Mécanisme de déprivation (privation) visuelle.....	60
3.3.4.2 Mécanisme d'amblyopie	60
3.4 Mécanismes de la perception de contenu 3D en condition d'interfaçage ou via une interface	61
3.4.1 Les différentes fonctionnalités exploitées	61
4 État de l'art des technologies « 3Ds » existantes.....	63
4.1 Représentation de contenu.....	63
4.1.1 Contenus stéréoscopiques 3D (3Ds).....	63
4.1.2 Contenu multivue (<i>Multiview Video - MVV</i>)	64
4.1.3 Contenu avec carte de profondeur	64
4.1.4 Contenu multivues avec carte de profondeur (<i>Multiview Video-plus-Depth - MVD</i>)	65
4.2 Création de contenu avec images réelles.....	65
4.2.1 Contenu stéréoscopiques 3D (3Ds) et multivues (<i>Multiview Video - MVV</i>).....	65
4.2.2 Contenu avec carte de profondeur et multivues avec carte de profondeur (<i>Multiview Video-plus-Depth - MVD</i>)	66
4.3 Technologies de restitution (affichage)	67
4.3.1 Présentation des interfaces visuelles « 3Ds »	67
4.3.2 Contexte de visualisation	71
4.3.2.1 Salle de cinéma en relief	71
4.3.2.2 Salle immersive	72
4.3.2.3 Visiocube ou « Cave »	72
4.3.3 Domaines d'usage de la 3Ds.....	73
4.3.3.1 Généralités	73
4.3.3.2 Usages dans les domaines grand public.....	74
4.3.3.3 Usages dans les applications professionnelles	75
4.4 Contraintes perceptives imposées par l'interfaçage 3Ds	77
4.4.1.1 Conflit accommodation-vergence	77
4.4.1.2 Incohérence visuo-vestibulaire	78
4.4.1.3 Incohérence de disparité verticale.....	79
4.4.1.4 Incohérence entre indices de profondeur (conflits d'indices monoculaires et binoculaires.....	80
4.4.1.5 Diamètre pupillaire	81
4.5 Contraintes perceptives imposées non spécifiques à la 3Ds.....	82
5 Règles de conception de contenu pour le confort visuel.....	83
5.1 Principe de conception des images stéréoscopiques	83
5.1.1 Parallaxe positive (non croisée).....	83
5.1.2 Parallaxe nulle	84
5.1.3 Parallaxe négative (croisée)	84
5.2 Choix des paramètres stéréoscopiques	88
5.2.1 Introduction	88
5.2.2 Relation entre parallaxe horizontale angulaire et disparité rétinienne :	89
5.2.3 Formules pour le réglage d'un couple d'images stéréoscopiques	90

5.2.4	Formule employée en photographie :	90
5.2.5	Formule employée en Réalité Virtuelle et infographie :	90
5.2.6	Formule employée au cinéma :	91
5.2.7	Formule employée à la télévision HD :	92
6	Estimation des effets sanitaires des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique (3Ds)	93
6.1	Introduction	93
6.2	Effets sanitaires identifiés.....	93
6.2.1	Confort visuel et fatigue visuelle	93
6.2.1.1	Considérations générales.....	93
6.2.1.2	Symptômes associés à la fatigue visuelle	94
6.2.1.3	Mesure de l'intensité de la fatigue visuelle	94
6.2.1.4	Hypothèses d'étiologie de la fatigue visuelle.....	95
6.2.2	Les autres effets	96
6.3	Populations potentiellement à risque	96
6.4	Exposition des populations	97
6.4.1	Un manque de données d'exposition aux technologies d'affichage 3Ds	97
6.4.2	Présentation de quelques données d'exposition pour l'affichage monoscopique traditionnel	97
7	Conclusions et recommandations du groupe de travail	99
	Bibliographie	103
	Glossaire	112
	ANNEXES.....	115
	Annexe 1 : Les formats de vidéo 3Ds	116
	Annexe 2 : Compléments sur la physiologie de la vision.....	120
	Annexe 3 : Bases cérébrales du système visuel	124
	Annexe 4 : Éléments sur le marché des technologies 3Ds	129
	Annexe 5 : Auto-saisine	131

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

relatives aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisé et du groupe de travail.

Présentation de la question posée

Ces dix dernières années ont vu le développement rapide de nouvelles technologies audiovisuelles en 3Ds (3D stéréoscopique¹). Après l'importante progression de l'offre de films en 3Ds au cinéma depuis le milieu des années 2000, on assiste aujourd'hui au développement de l'offre de téléviseurs, d'ordinateurs, de consoles de jeux et de téléphones mobiles équipés de technologies 3Ds. Les produits proposés utilisent des procédés qui n'impliquent plus nécessairement le port de lunettes spéciales, facilitant ainsi un large accès à ces technologies. Les systèmes audiovisuels en 3Ds trouvent aujourd'hui des applications aussi bien dans les secteurs domestiques que professionnels (simulateurs 3Ds par exemple).

Le développement de ces technologies 3Ds pose cependant la question de leur impact éventuel sur la santé et notamment sur la vision humaine. Plusieurs fabricants de dispositifs équipés de technologies 3Ds ont d'ailleurs émis des avertissements recommandant aux enfants ou aux populations souffrant de pathologies particulières d'éviter l'usage de ces produits.

Dans un courrier en date du 27 janvier 2011, l'association « Robin des bois » a saisi l'Anses afin que celle-ci émette un avis sur les risques sanitaires potentiellement induits par la console de jeux vidéo « Nintendo 3Ds ». L'Anses a répondu à l'association « Robin des bois », dans un avis daté du 13 juillet 2011, qu'une analyse préliminaire de la littérature existante ne permettait de se prononcer ni sur les risques sanitaires liés à l'utilisation de consoles de jeux 3Ds, ni sur un âge limite à partir duquel l'exposition aux images 3Ds des consoles de jeux n'affecterait pas le développement visuel de l'enfant.

¹ Le terme « 3D » est ambigu lorsque l'on parle des technologies audiovisuelles (Télévision 3D, Cinéma 3D, etc.) car la perception tridimensionnelle est possible aussi en affichant la même image pour les deux yeux de l'observateur. Cette problématique est exposée en détail dans la partie 2 du rapport d'expertise « introduction à l'interfaçage visuel ». Si chaque œil de l'observateur voit une image différente de celle vue par l'autre œil, on parle alors d'interfaçage visuel stéréoscopique. Pour bien préciser cette solution technologique, c'est l'abréviation « 3Ds » et non 3D qui est utilisée dans le rapport et cette synthèse.

Cependant, considérant

- que des études scientifiques suggèrent que, lors de la visualisation d'images en 3Ds, la fatigue visuelle apparaît plus vite et de manière plus intense qu'avec des images monoscopiques ;
- que les technologies 3Ds sont en constante évolution et que l'offre de matériel audiovisuel 3Ds, notamment destiné à un usage domestique, se développe rapidement ;
- que ces technologies peuvent être accessibles aux enfants dont le système visuel est en cours de développement ;
- que les populations qui peuvent être exposées aux différentes technologies 3Ds sont très diversifiées (enfants, population générale, travailleurs notamment) ;

l'Agence s'est auto-saisie, ainsi qu'elle l'avait annoncé dans son avis sur le sujet publié en juillet 2011, afin d'évaluer les risques sanitaires potentiels liés à l'usage des technologies audiovisuelles 3Ds.

Organisation de l'expertise

Le Conseil scientifique de l'Anses a donné un avis favorable, le 14 novembre 2011, à l'auto-saisine de l'Anses sur la question des impacts sanitaires des technologies audiovisuelles 3Ds. L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette auto-saisine. Sur avis du CES, l'Agence a également mandaté un groupe de travail « 3Ds » pour réaliser cette expertise. Ce groupe de travail a été constitué, à la suite d'un appel à candidatures public ouvert du 19 décembre 2011 au 1^{er} février 2012, d'experts en ophtalmologie, en ophtalmologie pédiatrique, en orthoptie, en sciences cognitives et d'experts physiiciens spécialistes des technologies 3Ds.

Le groupe de travail coordonné par l'Anses s'est réuni à 13 reprises en sessions plénières, du 16 avril 2012 au 16 janvier 2013. Le groupe de travail a par ailleurs sollicité l'audition d'experts scientifiques nationaux, internationaux et de représentants de fédérations et syndicats professionnels de la 3Ds afin d'obtenir toutes les informations pertinentes pour répondre à cette auto-saisine. Pour réaliser cette expertise, le groupe de travail s'est appuyé sur une large revue de la littérature scientifique internationale complétée par des auditions de personnalités scientifiques.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES « agents physiques », tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

Description de la méthode

L'analyse bibliographique entreprise par le groupe de travail « 3Ds » a été aussi exhaustive que possible. Les travaux scientifiques pris en compte dans le rapport sont principalement issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones à comité de lecture.

Afin d'évaluer les risques sanitaires potentiels des technologies 3Ds, les travaux d'expertise ont porté sur :

- les technologies 3Ds, à travers un état de l'art des technologies audiovisuelles existantes ;
- les mécanismes de la perception de l'environnement en 3Ds, y compris pour les enfants et les populations sensibles identifiées ;

- les effets sanitaires, à travers :
 - une analyse des travaux publiés concernant les effets sanitaires d'une exposition aux technologies audiovisuelles 3Ds ;
 - le recensement des différents dangers potentiels relatifs à une exposition aux technologies 3Ds ;
 - la caractérisation des différents modes d'exposition envisageables pour chaque technologie 3Ds ;
 - l'estimation des effets sanitaires potentiels, en décrivant les mécanismes biologiques associés, y compris pour les populations sensibles.

Résultat de l'expertise collective

Après une introduction sur l'interfaçage visuel, le rapport d'expertise présente les bases physiologiques de la perception tridimensionnelle et notamment le développement visuomoteur chez l'enfant.

Le rapport expose ensuite l'état de l'art des technologies 3Ds et liste les principaux domaines d'usage de la 3Ds, sans toutefois être exhaustif. L'usage de la 3Ds dans des applications grand public étant récent, il n'existe pas encore, à la date de publication de ce rapport, d'enquête suffisamment convaincante fournissant des données chiffrées liées à l'usage de contenu en 3Ds (nombre d'utilisateurs, fréquence d'observation, âge des utilisateurs, domaines concernés, etc.) en comparaison notamment de l'usage de contenu monoscopique. Par ailleurs, cet état de l'art présente uniquement les dispositifs largement commercialisés. Les technologies en développement qui seront éventuellement utilisées dans le futur, comme par exemple celles basées sur l'holographie, ne sont notamment pas décrites.

Ce rapport présente les règles de conception de contenu 3Ds qui peuvent être appliquées pour améliorer le confort visuel dans les différents domaines d'usage. Ces règles de conception sont celles employées aujourd'hui par les professionnels en 3Ds ; elles n'ont pas été discutées et validées par le groupe de travail et ne doivent pas être perçues comme préconisées par l'Anses. Ce rapport n'a pas pour objectif de présenter toutes les autres règles techniques ou artistiques utilisées en 3Ds pour la bonne réalisation d'un contenu en relief.

Enfin, les données disponibles sur les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique sont exposées.

La capacité à distinguer le monde réel d'un monde virtuel dans le développement psycho-visuel est une question importante en soi, mais n'entre pas dans le champ de l'auto-saisine. Les effets sanitaires (addiction, confusion réel-virtuel, etc.) d'une immersion dans un monde virtuel, non spécifiques aux technologies 3Ds, ne sont donc pas l'objet de ce rapport.

Le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective, objets du présent rapport, lors de sa séance du 10 février 2014. Il a adopté les conclusions et recommandations formulées dans cette synthèse le 28 mars 2014 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Conclusions de l'expertise collective

La perception tridimensionnelle

La perception de l'espace en 3 dimensions fait intervenir différents facteurs. Un des facteurs les plus importants est la vision stéréoscopique, c'est-à-dire la perception de la profondeur et de la distance d'un objet résultant du chevauchement des champs de vision des deux yeux. Les yeux étant distants, en moyenne, de 65 mm l'un de l'autre chez l'adulte, chaque œil perçoit l'objet avec

un angle de vue légèrement différent, ce qui produit des images rétiniennes différentes. Cette différence est exploitée par le cerveau qui fusionne ces deux images pour mieux percevoir l'objet en 3 dimensions.

Les différences individuelles

La qualité de la vision stéréoscopique est influencée dans les conditions physiologiques par un nombre important de caractéristiques individuelles : la distance interpupillaire, le diamètre pupillaire, le pouvoir de vergence, la relation entre l'accommodation et la vergence des yeux², l'âge, l'acuité visuelle de chaque œil, etc.

Une partie de la population possède une vision stéréoscopique déficiente, certaines personnes en étant même démunies du fait d'anomalies du système visuel. Une étude récente montre que lors de l'usage de technologies 3Ds, les personnes possédant une vision stéréoscopique déficiente présentent moins de symptômes que les personnes possédant une vision stéréoscopique normale [Kim *et al.*, 2013]³. D'après des rapports de l'Institut de la santé et de la recherche médicale (Inserm) et de la Haute autorité de santé (ex. Anaes) ([Inserm, 2002]⁴[Anaes, 2002]⁵) s'intéressant à la population française, 20 % des enfants de moins de 6 ans présentent une anomalie visuelle. Parmi ces anomalies, la plus fréquente est l'amblyopie unilatérale, pouvant entraver la vision stéréoscopique. Selon les études sur le sujet, 3 à 8 % de la population générale présente une amblyopie définitive qui correspond à un déficit visuel fonctionnel. Une revue récente indique par ailleurs une prévalence de 5 à 33 % [Cooper et Jamal, 2012]⁶ pour les anomalies de la vergence. Dans la population active, la proportion d'individus présentant des anomalies de la vision stéréoscopique serait inférieure à ces chiffres, mais il n'existe aucune donnée épidémiologique concernant ces troubles.

Le développement visuel de l'enfant

L'ensemble des publications s'intéressant au développement visuel chez l'enfant s'accordent pour dire qu'il existe plusieurs phases de développement du système visuel. Il est cependant difficile de définir des âges précis encadrant ces phases.

Dans le développement normal, la croissance du globe oculaire est observée jusqu'à l'âge de 4 ans et rejoint quasiment celle de l'adulte à cet âge. Cependant, la maturation neuronale du système visuel se poursuit jusqu'à l'adolescence.

La vision binoculaire commence à se développer dès les premiers mois de vie, s'affine avec la maturation neuronale jusqu'à 10-11 ans et se poursuit jusqu'à la fin de la maturation fovéolaire entre 13 et 16 ans.

Ces données sont importantes car elles mettent en évidence l'existence d'une plasticité au-delà du simple développement de l'acuité visuelle, qui généralement est acquise à l'âge de 6 ans. Le

² Pour jauger le lien entre l'accommodation et la vergence chez une personne, on mesure le rapport « accommodation – vergence » (AC/A) qui donne la quantité de vergence accommodative pour une dioptrie d'accommodation.

³ Kim SH, Suh YW, Yun C, Yoo EJ, Yeom JH, Cho YA., Eye (Lond). *Influence of stereopsis and abnormal binocular vision on ocular and systemic discomfort while watching 3D television*. 2013 Nov;27(11):1243-8. doi: 10.1038/eye.2013.173. Epub 2013 Aug 9.

⁴ Inserm, 2002, Expertise collective, Déficiences visuelles : Dépistage et prise en charge chez le jeune enfant.

⁵ Anaes, 2002, Dépistage précoce des troubles de la fonction visuelle chez l'enfant pour prévenir l'amblyopie.

⁶ Cooper J, Jamal, N. *Convergence insufficiency--a major review*, 2012, American Optometric Association.

tableau suivant présente les âges moyens des périodes de maturation du système visuel (Cf. Figure 1).

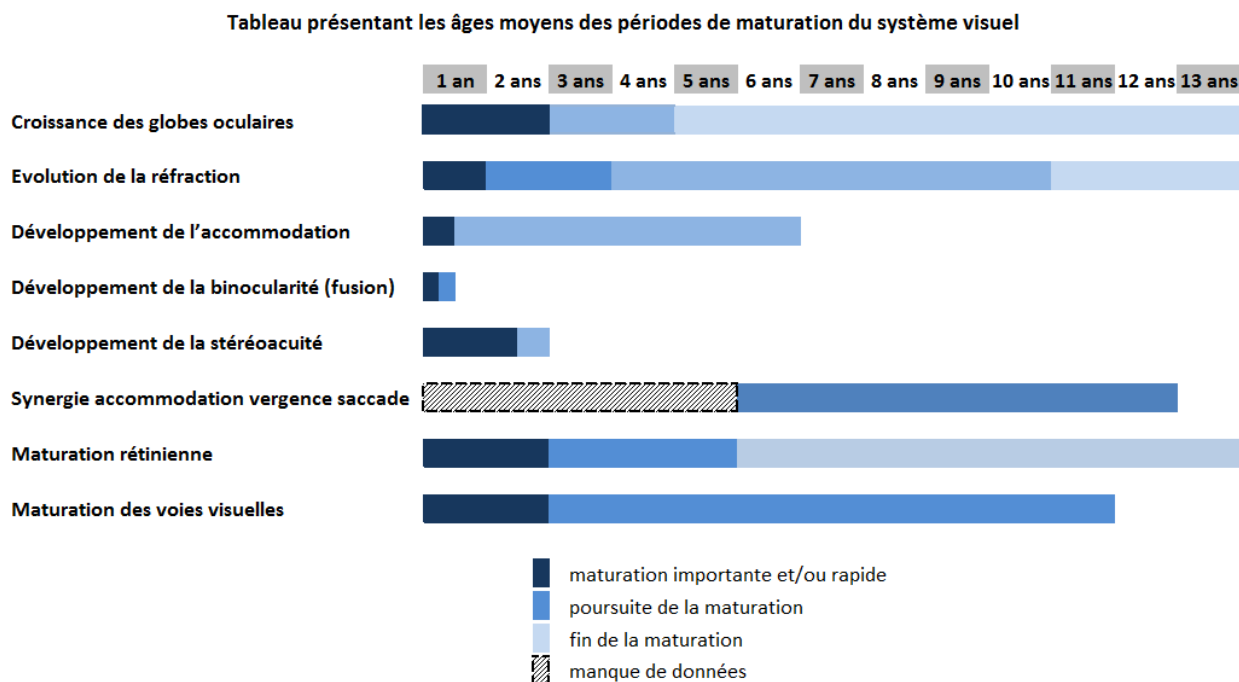


Figure 1 : Tableau présentant les âges moyens des périodes de maturation visuelle

Ces limites d'âges varient cependant en fonction des enfants et du terrain (prématurité par exemple). Lors de ces périodes dites sensibles, le système visuel de l'enfant serait le plus vulnérable, lorsque les stimulations extérieures sont les plus susceptibles d'interférer sur les étapes d'acquisition de la maturation (fonctionnelle ou anatomique) visuelle complète.

Les interfaces visuelles exploitant la vision stéréoscopique

Quelle que soit la technique employée dans les différentes interfaces visuelles stéréoscopiques, l'objectif est toujours le même : fournir à chaque œil une image différente. Pour ceci, il existe aujourd'hui deux procédés : soit on place près des yeux deux petits écrans (cas des visiocasques), soit on sépare techniquement les deux images affichées sur un seul écran (ou ensemble d'écrans).

Il existe ainsi 3 types d'interfaces visuelles en 3Ds :

- les visiocasques (ou vidéo-lunettes) ;
- les écrans auto-stéréoscopiques (écrans avec illumination, écrans à barrière de parallaxe, écrans avec réseau lenticulaire) ;
- les interfaces nécessitant le port de lunettes (procédé par filtrage colorimétrique, lunettes polarisantes, lunettes à obturation électronique).

Des contextes de visualisation très disparates

Les domaines d'applications des technologies audiovisuelles exploitant la vision stéréoscopique sont très variés, allant de certaines activités professionnelles très spécialisées aux loisirs grand public (cinéma, jeux vidéo, télévision, art, etc.).

Les supports des interfaces visuelles en 3Ds sont eux aussi très différents : écrans de cinéma, téléviseurs, écrans de tablette numérique, *smartphones* et consoles de jeux et visiocasques, correspondant à des conditions d'observation et d'usage très variables. Selon les domaines

d'applications (domestiques ou professionnels) et selon les interfaces utilisées, les temps d'exposition aux systèmes 3Ds peuvent s'étaler de quelques instants à plusieurs heures (par exemple au cinéma ou dans le monde professionnel).

Les contraintes visuelles engendrées par les interfaces stéréoscopiques

En conditions naturelles, les yeux convergent et accommodent à la même distance, c'est-à-dire à la distance de l'objet observé dans le monde réel. Le principe technique de la restitution stéréoscopique (en 3Ds) ne permet pas de respecter ce principe physiologique. Si les yeux convergent bien à la distance perçue de l'objet virtuel, c'est en revanche toujours à l'endroit où sont affichées les images réelles, c'est-à-dire au niveau de l'écran, que l'accommodation se fait. L'accommodation et la vergence des yeux ne se font ainsi pas à la même distance. Ce conflit ainsi qu'un certain nombre d'autres incohérences font que les interfaces stéréoscopiques ne peuvent pas reproduire les conditions et les effets de la vision binoculaire naturelle. Les effets possibles du conflit accommodation-vergence sur les utilisateurs de ces interfaces doivent donc être étudiés, en matière de confort visuel et de risques sanitaires potentiels.

Il existe cependant une zone nommée « zone de confort » où, en dépit d'un conflit modéré entre accommodation et vergence, le confort visuel pour la vision stéréoscopique est assuré. Au-delà de cette zone, le confort visuel n'est plus acceptable, la fusion binoculaire y est plus difficile, voire impossible.

Qualité des contenus et des interfaces stéréoscopiques

Les contenus 3Ds (films, jeux, etc.) actuellement disponibles sur le marché sont de qualité très hétérogènes en matière de confort visuel offert aux observateurs. Constatant qu'il n'existe pas à ce jour de réglementation sur l'adéquation des produits et des contenus 3Ds avec le respect des contraintes physiologiques de l'observateur, il est apparu nécessaire aux différentes organisations professionnelles de la filière technique cinématographique et télévisuelle (Ficam, CST, UP3D, AFC, HD-Forum)⁷ de réaliser un livre blanc⁸ dressant l'état des lieux des techniques audiovisuelles de restitution du relief. Ce document dresse un état de l'art de la création de contenu, de la diffusion d'images et des aspects physiologiques associés. Il pointe l'existence de difficultés techniques liées à la réalisation de contenu 3D stéréoscopique de qualité en matière de confort visuel.

Au niveau international, le consortium international *3D@home*⁹, qui regroupe principalement des acteurs commerciaux et industriels de la 3Ds, se penche également sur la création de contenus 3Ds de qualité, ainsi que sur les facteurs humains correspondants. Plusieurs entreprises fournissent des labels de qualité de films en relief.

Estimation des effets sanitaires des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique (3Ds)

En analysant la littérature scientifique disponible, le groupe de travail a identifié différents effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux interfaces audiovisuelles en 3Ds, l'effet le plus important étant la fatigue visuelle.

⁷ Ficam, CST, UP3D, AFC : cf. liste des abréviations dans le rapport d'expertise collective.

⁸ « Le Livre Blanc du Relief (3Ds) au cinéma et à la télévision », http://www.dig-it.fr/wp-content/uploads/downloads/2012/05/LivreBlancReliefV2_BasseDef1.pdf

⁹ <http://www.3dathome.org/>

Les risques sanitaires liés aux interfaces visuelles en 3Ds sont très dépendants des capacités visuelles de l'observateur (différences individuelles importantes) ainsi que de la qualité technologique des interfaces audiovisuelles 3Ds et des contenus utilisés.

Les différentes technologies stéréoscopiques (avec lunettes) et auto-stéréoscopiques (sans lunettes) ne changent pas le problème de fond (conflit accommodation-vergence). Il faut cependant noter que de nouvelles technologies se développent (holoscopie et holographie) qui ont le potentiel de supprimer le conflit accommodation-vergence [Kovacs et Balogh, 2013]¹⁰.

La fatigue visuelle

Une cause importante de fatigue visuelle, associée à une exposition aux interfaces audiovisuelles en 3Ds, est liée au « conflit accommodation-vergence ».

Les symptômes de cette fatigue visuelle sont :

- l'asthénopie accommodative (fatigue et douleurs péri-oculaires) ;
- la sensation d'œil sec, les troubles de la vision (diplopie, une sensibilité réduite aux contrastes spatiaux, une diminution de l'acuité visuelle et de la rapidité de perception) ;
- les troubles extra-oculaires (comme les maux de tête, les douleurs au cou, les maux de dos et aux épaules, des baisses de performances dans les activités mentales, des pertes de concentration).

Les autres effets

D'autres effets sanitaires peuvent potentiellement apparaître, notamment des effets liés à l'équilibre postural (vertiges) ou des effets liés à l'appréciation du réel (altération de la perception de l'environnement). Ces effets liés à une exposition aux interfaces 3Ds restent encore mal étudiés, mais pourraient générer un risque accidentel ponctuel lié aux vertiges.

L'interaction entre le conflit sensori-moteur accommodation-vergence et l'engagement émotionnel du spectateur lié à l'esthétisme des technologies 3Ds n'est par ailleurs pas connue.

¹⁰ Kovacs P. T. and Balogh T, *3D Light-Field Display Technologies*, in F. Dufaux, B. Pesquet-Popescu and M. Cagnazzo, editors, *Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering*, Wiley, 2013.

Populations potentiellement à risque

Pendant l'enfance et jusqu'à l'adolescence, le couplage physiologique « accommodation-vergence » poursuit sa maturation. Certaines recherches [Kapoula *et al.*, 2012]¹¹ suggèrent que l'exposition à des conflits accommodation-vergence de faible amplitude chez des enfants de 13 à 17 ans peut être plus perturbatrice que l'exposition à des conflits d'amplitude plus importante. Les personnes sujettes à des troubles infra-cliniques spécifiques (déficits vestibulaires, hétérophorie, insuffisance de vergence, strabisme accommodatif, *etc.*) peuvent faire partie des populations à risque, car elles pourraient présenter un seuil de tolérance plus bas au conflit accommodation-vergence.

Exposition des populations

Il n'existe pas à ce jour de données d'exposition de la population aux technologies audiovisuelles en 3Ds. Cependant, des études récentes de l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) montrent que l'exposition de la population à la télévision et aux jeux vidéo peut atteindre plusieurs heures par jour. De ce fait, il est possible que ces niveaux d'exposition se transposent partiellement, dans les années qui viennent, aux technologies en 3Ds. Le développement des interfaces dans le domaine des loisirs laisse donc présager d'une augmentation potentiellement forte du temps d'exposition, notamment pour les plus jeunes.

Il existe des systèmes de conversion dits 2D/3D qui transforment un contenu monoscopique en un contenu stéréoscopique, par des algorithmes plus ou moins automatiques et plus ou moins performants. Pour le cinéma, des films réalisés en monoscopique ont été convertis en 3Ds, généralement avec une intervention manuelle. Pour les écrans 3Ds, il est maintenant possible pour le téléspectateur de transformer à volonté un contenu 2D en un contenu 3Ds, en faisant qui plus est varier la quantité de parallaxe.

Cela pose la question d'une augmentation potentiellement forte (temps d'exposition) et non contrôlée (quantité de parallaxe horizontale et qualité de l'expérience 3D liée au contenu converti) de l'exposition à la 3Ds.

Avec le développement et l'exploitation des technologies 3Ds, les populations professionnelles peuvent être amenées elles aussi à être plus exposées. Les durées d'exposition pourraient néanmoins être mieux contrôlées dans ces domaines et les effets potentiels mieux suivis que dans le grand public.

Recommandations du CES

En matière d'études et de recherche

Les technologies stéréoscopiques génèrent un conflit entre les processus d'accommodation et de vergence. Les effets sanitaires de l'exposition à de telles technologies n'ont été que partiellement étudiés chez l'adulte et rarement chez l'enfant. Les études menées jusqu'à présent sont basées sur une évaluation orthoptique fournissant des mesures de nature qualitative. Dans ce domaine, la dynamique physiologique de la motricité oculaire ainsi que les synergies entre vergence, accommodation et saccades restent inexplorées.

¹¹ Kapoula Z., Gaertner C., Matheron, E., *Spherical lenses and prisms lead to postural instability in both dyslexic and non dyslexic adolescents*. Plos one, 2012, 7(11)

Données sur l'exposition

Compte tenu du manque de données concernant l'exposition de la population aux technologies 3Ds, le CES recommande d'identifier les usages de la 3Ds ainsi que les populations concernées, de mieux caractériser les expositions des différentes populations exposées aux technologies 3Ds (adultes, enfants et adolescents et utilisateurs professionnels) et de mettre en place un suivi des expositions.

Études cliniques et physiologiques

Afin notamment d'améliorer la qualité des travaux portant sur l'étude des effets sanitaires des technologies 3Ds, le CES recommande de développer et valider des méthodes d'évaluation de la fatigue visuelle (construction de scores).

Compte tenu du manque de données, le CES recommande que des recherches soient encouragées pour :

- approfondir la connaissance du développement des systèmes binoculaires visuel et visuo-moteur de l'enfant et du maintien et vieillissement du fonctionnement de ces systèmes binoculaires à l'âge adulte ;
- quantifier les altérations éventuelles du système visuo-moteur (saccade, accommodation, vergence et synergie entre ces composantes) pendant et après la visualisation de contenus stéréoscopiques *versus* monoscopiques ;
- étudier les conséquences à long terme des expositions à la 3Ds sur la vision à tous les âges de la vie : une exposition unique prolongée peut-elle notamment entraîner une décompensation permanente de la synergie accommodation-vergence ou des déséquilibres posturaux dans le cas d'un terrain fragile ?
- étudier les conséquences psychologiques liées spécifiquement à la 3Ds (engagement émotionnel dans le cadre des loisirs, effet immersif, *etc.*) ;
- explorer les effets d'une exposition à la 3Ds sur le système vestibulaire, l'équilibre et le contrôle postural et la marche.

Il est souhaitable que ces études soient menées suivant une approche pluridisciplinaire engageant des compétences en création 3Ds, en oculomotricité binoculaire, en psychophysique de la vision, en orthoptie, en ophtalmologie, en oto-rhino-laryngologie et en posturologie.

De même, il y aurait un intérêt à réaliser de telles études chez diverses populations saines et sensibles (enfants ou adultes avec troubles oculomoteurs ou troubles d'équilibre).

Études épidémiologiques

Compte tenu du manque de données concernant la caractérisation de la vision binoculaire dans la population générale, le CES recommande la mise en œuvre de travaux épidémiologiques pour évaluer, dans différentes tranches d'âge, la qualité de la vision binoculaire et la prévalence des troubles potentiels : insuffisance de convergence, anisométrie, phorie, amblyopie, microstrabisme, troubles de l'équilibre en l'absence de pathologies vestibulaires, qualité de la vision binoculaire chez la personne âgée incluant les personnes sujettes à des chutes en l'absence de pathologie identifiée, *etc.*

En particulier, ces travaux devraient permettre d'évaluer et d'étudier les conséquences à long terme des expositions à la 3Ds sur la vision à tous les âges de la vie, notamment si le fait de

ressentir de manière répétée des effets transitoires à court terme engendre des effets sanitaires permanents.

En matière d'information sur les expositions

Le CES recommande d'informer les utilisateurs que les individus n'ont pas la même sensibilité face aux technologies audiovisuelles 3Ds. Les différences individuelles pouvant expliquer des réactions différentes sont nombreuses : âge, qualité de la vision stéréoscopique, présence d'autres pathologies visuelles, *etc.* La durée et la fréquence des expositions doivent également être considérées pour apprécier les effets potentiels, notamment pour les enfants, adolescents et les utilisateurs professionnels.

Pour la population générale :

Deux types d'exposition peuvent être distingués : jeux vidéo et télévision 3Ds au quotidien d'une part, et cinéma 3Ds d'autre part.

La fatigue visuelle pouvant apparaître lors de la visualisation de contenu 3Ds est liée dans sa majeure partie au conflit accommodation-vergence inhérent aux interfaces 3Ds. Les symptômes liés à cette fatigue visuelle sont nombreux et variés : maux de tête, fatigue oculaire, yeux rouges, *etc.* En l'état actuel des connaissances et compte tenu des niveaux d'exposition constatés aujourd'hui, ces symptômes semblent être transitoires.

Le CES recommande que les personnes ressentant des symptômes lors de l'exposition à des interfaces 3Ds limitent alors leur temps d'exposition et invite ces mêmes personnes à consulter des professionnels de la santé visuelle afin de dépister d'éventuelles pathologies visuelles.

Le CES recommande que les professionnels de la 3Ds et les pouvoirs publics mettent à disposition des utilisateurs l'information sur les symptômes potentiellement ressentis et les conditions d'exposition recommandées pour les éviter, en fonction des différentes interfaces (cinéma, télévision, consoles de jeux *etc.*).

D'une manière générale, il est conseillé pour tout utilisateur de téléviseur 3Ds ou de console de jeux 3Ds de respecter les recommandations données par les constructeurs des dispositifs 3Ds¹². Il est recommandé que les utilisateurs gardent leurs corrections optiques pendant la visualisation de contenus 3Ds.

En particulier, pour un spectateur ressentant de l'inconfort visuel en regardant des images stéréoscopiques (cinéma ou télévision), il est recommandé de ne pas se positionner trop proche de l'écran 3Ds. En effet, plus le spectateur est éloigné de l'écran stéréoscopique, moins il subit de contraintes sur son système visuel.

Par ailleurs, notamment pour certaines technologies de visualisation sans lunettes (écrans auto-stéréoscopiques de téléviseurs 3Ds ou de consoles de jeux 3Ds), la distance entre l'écran et l'observateur est fixe. Il est cependant possible de faire varier la parallaxe horizontale absolue du couple d'images stéréoscopiques, et ainsi faire varier l'effet de profondeur : il est dans ce cas recommandé pour un spectateur ressentant de l'inconfort visuel de diminuer l'effet de relief (parallaxe horizontale).

Le CES tient par ailleurs à alerter le public que la survenue de symptômes après une exposition aux technologies 3Ds pourrait être accidentogène (par exemple reprise de la conduite dans un état non adapté).

¹² des recommandations spécifiques détaillées sont fournies dans le chapitre 5.2 du rapport d'expertise collective produit par le groupe de travail « 3Ds ».

En complément, le CES estime pertinent que des organismes publics vulgarisent, par exemple sur un portail internet à vocation pédagogique, le principe de la vision binoculaire, les principes de fonctionnement des technologies 3Ds et les effets sanitaires potentiels, notamment ceux liés au conflit accommodation-vergence.

Pour les enfants et les adolescents

Compte tenu des âges clef dans le développement du système visuel déterminés par le groupe de travail « 3Ds », le CES recommande :

- de ne pas exposer les enfants de moins de 6 ans¹³ aux technologies 3Ds ;
- de limiter l'exposition des moins de 13 ans et d'être attentif aux éventuels symptômes induits.

Par ailleurs, le CES incite à sensibiliser les professionnels médicaux et paramédicaux de la petite enfance et les ophtalmologistes sur les mécanismes mis en jeu lors de la visualisation d'interfaces 3Ds, afin qu'ils puissent informer les parents sur les symptômes et risques potentiels.

Pour les populations professionnelles

Compte tenu du développement potentiel des technologies 3Ds dans le monde du travail, le CES recommande aux services de santé au travail et aux comités d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT) :

- d'informer les employeurs et les salariés des mécanismes mis en jeu lors de la visualisation d'interfaces 3Ds et des risques potentiels associés, pour éviter la survenue d'éventuels effets sanitaires ;
- d'effectuer un suivi des salariés exposés et une adaptation du poste de travail si nécessaire.

Pour les professionnels de la 3Ds (stéréographes, producteurs de film, etc.)

Le CES recommande aux professionnels de respecter, notamment auprès du public, la terminologie appropriée aux technologies utilisant la vision stéréoscopique : technologies 3D stéréoscopique ou en abrégé « 3Ds » et non « 3D », afin d'éviter la confusion avec la représentation tridimensionnelle monoscopique.

Le CES recommande aux professionnels d'informer le public du risque d'inconfort visuel (conflit accommodation – vergence) lié à l'usage des technologies 3Ds et les moyens d'y remédier.

Dans l'objectif de limiter la fatigue visuelle, le CES recommande de prendre en compte notamment les facteurs suivants lors de la création de contenu 3Ds :

- limitation de la disparité rétinienne en amplitude, en variation et en durée ;
- minimisation de la parallaxe verticale, des effets de bords d'écran, des différences chromatiques inter-vues en fonction des fréquences spatiales des images (flou des images), etc.

Il est à noter que la limitation de la disparité rétinienne de l'observateur revient à limiter la parallaxe horizontale angulaire. Cette dernière dépend de la parallaxe horizontale absolue (distance sur l'écran de deux points homologues du couple d'images stéréoscopiques) et de la distance de l'observateur à l'écran. Si cette dernière est variable, il faut considérer le cas le plus défavorable.

D'une manière générale, le CES suggère que les professionnels des technologies 3Ds suivent les recommandations techniques émises par les groupes et *consortia* de professionnels visant à produire des contenus audiovisuels de qualité.

¹³ à l'exception des méthodes thérapeutiques sous contrôle médical.

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 28 mars 2014.

Sigles et abréviations

3D : trois dimensions

3Ds : 3D stéréoscopique

4K : résolution de 4096 par 2160 pixels

AC : *accomodative convergence* – vergence accomodative (CA)

AC/A : rapport de la vergence accommodative à l'accommodation

AFC : Association française des directeurs de la photographie cinématographique

CES : comité d'experts spécialisé

CGL : corps genouillé latéral

CST : Commission supérieure technique de l'image et du son

DIBR : *Depth-Image-Based-Rendering* : rendu basé sur l'image en profondeur

Ficam : Fédération des industries du cinéma, de l'audiovisuel et du multimédia

HDTV : *High-definition Television* – Télévision haute définition

Insee : Institut national de la statistique et des études économiques

IRBA : Institut de recherche biomédicale des armées

MVD : *Multiview Video plus Depth* : vidéo multivues avec carte de profondeur

MVV : *Multiview Video* : vidéo multivues

PEV : potentiels évoqués visuels

SVH : système visuel humain

UP3D : Union des professionnels de la 3Ds

Liste des tableaux

Tableau 1 : maturation des globes oculaires.....	58
Tableau 2 : emmétropisation à la fin de la deuxième année.....	58
Tableau 3 : développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréoaucuité.....	58
Tableau 4 : maturation des voies visuelles.....	59
Tableau 5 : mesure des décalages des lointains pour différentes largeurs d'écran, source Alain Derobe – CST, Janvier 2009	91

Liste des figures

Figure 1 : schéma récapitulatif de l'interfaçage visuel.....	29
Figure 2 : anatomie de l'œil humain	32

Figure 3 : accommodation pour un objet à l'infini (figure de gauche) et un objet proche (à droite)	32
Figure 4 : schéma présentant la structure de la rétine	33
Figure 5 : les variations de lumière et les ombres augmentent le « relief »	37
Figure 6 : perception de la profondeur par la taille relative	38
Figure 7 : perception de la profondeur par interposition	38
Figure 8 : impression de profondeur par différences de densité des éléments d'une image	39
Figure 9 : variation de la visibilité dans une scène extérieure	39
Figure 10 : parallaxe de mouvement illustrée par le flou de bougé.	40
Figure 11 : perception de la profondeur par la perspective	41
Figure 12 : horoptère géométrique	44
Figure 13 : diplopie et confusion	44
Figure 14 : aire de Panum et aire fusionnelle de Panum	45
Figure 15 : position des yeux au cours du temps pendant une saccade vers la gauche (source : Mays <i>et al.</i> , 1986).	50
Figure 16 : séquences principales des saccades (source : Leigh et Zee, 2006)	51
Figure 17 : position des yeux au cours du temps pendant une vergence (à gauche) et pendant une divergence (à droite) (source : Mays <i>et al.</i> , 1986)	53
Figure 18 : indices permettant la perception de la profondeur de l'espace tridimensionnel	55
Figure 19 : tableau présentant les âges moyens des périodes de maturation visuelle	60
Figure 20 : présentation des différentes fonctionnalités pour voir un espace en 3 dimensions	62
Figure 21 : représentation « stéréoscopique 3D », exemple de vues gauche et droite	63
Figure 22 : représentation MVV (<i>Multiview Video</i>), exemple de N vues	64
Figure 23 : représentation vidéo-plus-profondeur, exemple d'une vidéo et de la carte de profondeur correspondante	65
Figure 24 : représentation MVD: exemple de N vues et des cartes de profondeur correspondantes	65
Figure 25 : dispositif 3Ds avec deux caméras côte à côte ; a) géométrie parallèle, b) géométrie convergente	66
Figure 26 : dispositif 3Ds avec deux caméras perpendiculaires et un miroir semi-transparent	66
Figure 27 : principe de la vision avec écran auto-stéréoscopique à illumination	68
Figure 28 : principe de la vision avec écran auto-stéréoscopique à réseau lenticulaire	68
Figure 29 : principe d'un écran auto-stéréoscopique à barrières de parallaxe	69
Figure 30 : principe de la vision stéréoscopique avec lunettes actives, on voit le capteur infrarouge au milieu des lunettes	70
Figure 31 : schéma de principe d'un visiocasque à écrans LCD	71
Figure 32 : salle immersive avec écran semi-cylindrique	72
Figure 33 : le SAS3, visiocube transportable et multi plate-forme de Clarté à Laval	73
Figure 34 : exemple de colocalisation pour une étude ergonomique de planche de bord, avec l'espace perçu visuellement correspondant à l'espace corporel du conducteur	74

Figure 35 : distances d'accommodation et de vergence en situation naturelle (à gauche) et en situation d'interfaçage 3Ds (à droite)	77
Figure 36 : expérience de déséquilibre lié à la vision d'une image en rotation	79
Figure 37 : disparité verticale	80
Figure 38 : effet de la distance de l'observateur à l'écran sur le relief perçu	80
Figure 39 : représentation schématique de l'efficacité des neuf indices principaux de perception de la profondeur en fonction de la distance par rapport à l'observateur ([Cutting et Vishton, 1995])	81
Figure 40 : parallaxe positive permettant de visualiser des objets derrière l'écran ; distance interpupillaire = distance intra oculaire (65 mm en moyenne)	84
Figure 41 : parallaxe nulle, les points homologues sont au même endroit	84
Figure 42 : parallaxe négative permettant de visualiser des objets devant l'écran	84
Figure 43 : mouvements pseudoscopiques quand l'observateur bouge la tête non traquée	85
Figure 44 : la profondeur perçue dépend de la position de l'observateur par rapport à l'écran	86
Figure 45 : zone d'observation	86
Figure 46 : projections de la face avant d'un cube	87
Figure 47 : parallaxe horizontale angulaire, angle DPG	88
Figure 48 : illustration de la disparité rétinienne	89
Figure 49 : formats FC côte-à-côte : a) haut-bas, b) gauche-droite.	116
Figure 50 : formats FC entrelacés : a) par colonne, b) par ligne, c) en damier.	117
Figure 51 : format FC temporel.	117
Figure 52 : schéma MVC (<i>Multiview Video Coding</i>).	118
Figure 53 : cortex visuel primaire et aires visuelles secondaires	125
Figure 54 : champ récepteur d'une cellule simple	126
Figure 55 : champ récepteur d'une cellule simple à orientation verticale	126
Figure 56 : champ récepteur d'une cellule complexe	128
Figure 57 : état des lieux du nombre de salles de cinéma monoscopique (<i>Digital cinema</i>) et stéréoscopique (<i>Digital 3D</i>) en 2007	129
Figure 58 : nombre de films en 3Ds pour chaque année de 2005 à 2013	130

1 Contexte, objet et modalités de traitement de l'auto-saisine

1.1 Contexte

Ces dix dernières années ont vu le développement rapide de nouvelles technologies audiovisuelles en 3Ds (3D stéréoscopique¹⁴). Après la multiplication des films en 3Ds au cinéma depuis le milieu des années 2000, on assiste aujourd'hui au développement de l'offre de téléviseurs, d'ordinateurs, de consoles de jeux et de téléphones mobiles équipés de technologies 3Ds. Les produits proposés utilisent des procédés qui n'impliquent plus nécessairement le port de lunettes spéciales, facilitant ainsi un large accès à ces technologies. Les systèmes audiovisuels en 3Ds trouvent aujourd'hui des applications aussi bien dans les secteurs domestiques que professionnels (simulateurs 3Ds par exemple).

Le développement de ces technologies 3Ds pose cependant la question de leur impact éventuel sur la santé et notamment sur la vision humaine. Plusieurs fabricants de dispositifs équipés de technologies 3Ds ont d'ailleurs émis des avertissements recommandant aux enfants ou aux populations souffrant de pathologies particulières d'éviter l'usage de ces produits.

Dans un courrier en date du 27 janvier 2011, l'association « Robin des bois » a saisi l'Anses afin que celle-ci émette un avis au sujet des effets sanitaires de la console de jeux « Nintendo 3Ds ». L'Anses a répondu à l'association « Robin des bois », dans un avis daté du 13 juillet 2011, que l'analyse de la littérature existante ne permettait de se prononcer ni sur les risques sanitaires liés à l'utilisation de consoles de jeux 3Ds, ni sur un âge limite à partir duquel l'exposition aux images 3Ds des consoles de jeux n'affecterait pas le développement visuel de l'enfant.

Considérant cependant :

- que certaines études scientifiques suggèrent que, lors de la visualisation d'images en 3Ds, la fatigue visuelle semble apparaître plus vite et de manière plus intense qu'avec des images monoscopiques ;
- que les technologies 3Ds sont en constante évolution et que l'offre de matériel audiovisuel 3Ds, notamment destiné à un usage domestique, se développe rapidement ;
- que ces technologies peuvent être accessibles aux enfants dont le système visuel est en cours de développement ;
- que les populations qui peuvent être exposées aux différentes technologies 3Ds sont très diversifiées (enfants, population générale, travailleurs, etc.) ;

l'Agence avait annoncé, dans son avis sur le sujet de juillet 2011, son intention de s'auto-saisir afin d'évaluer les risques sanitaires éventuels liés à l'usage des technologies audiovisuelles 3Ds.

¹⁴ Le terme « 3D » est ambigu lorsque l'on parle des technologies audiovisuelles (Télévision 3D, Cinéma 3D, etc.) car la perception tridimensionnelle est possible aussi en affichant la même image pour les deux yeux de l'observateur. Cette problématique est exposée en détail dans la partie 2 « introduction à l'interfaçage visuel ». Si chaque œil de l'observateur voit une image différente de celle vue par l'autre œil, on parle d'interfaçage visuel stéréoscopique. Pour bien préciser cette solution technologique, nous employons dans ce rapport, comme les spécialistes du domaine, l'abréviation "3Ds" et non 3D trop vague.

1.2 Objet de l'auto-saisine

Afin d'évaluer les risques sanitaires potentiels des technologies 3Ds, les travaux d'expertise ont porté sur :

- les technologies 3Ds, à travers un état de l'art des technologies audiovisuelles existantes ;
- Les mécanismes de la perception de l'environnement en 3Ds, y compris pour les enfants et les populations sensibles identifiées ;
- les effets sanitaires, à travers :
 - une analyse des travaux publiés ou en cours de publication concernant les effets sanitaires d'une exposition aux technologies audiovisuelles 3Ds ;
 - le recensement des différents dangers potentiels relatifs à une exposition aux technologies 3Ds ;
 - la caractérisation des différents modes d'exposition envisageables pour chaque technologie 3Ds ;
 - l'estimation des effets sanitaires potentiels, en décrivant les mécanismes biologiques associés, y compris pour les populations sensibles.

Le rapport d'expertise présente les bases du développement visuel (comprenant les voies visuelles cérébrales – cf. Annexe 3). Cependant, la capacité à distinguer le monde réel d'un monde virtuel dans le développement psycho-visuel a été considérée hors du champ de ce travail d'expertise. L'audition du Prof. Laurence Vaivre-Douret par le groupe de travail a en effet mis en évidence le manque d'études cliniques et scientifiques sur la question de l'impact des images virtuelles. Les effets sanitaires (addiction, confusion réel-virtuel, etc.) d'une immersion dans un monde virtuel, par ailleurs non spécifiques aux technologies 3Ds, ne sont donc pas l'objet de ce travail.

Ce rapport liste les principaux domaines d'usage de la 3Ds, sans toutefois être exhaustif. L'usage de la 3Ds dans des applications grand public étant récent, il n'existe pas encore, à la date de publication de ce rapport, d'enquête suffisamment crédible fournissant des données chiffrées liées à l'usage de contenu en 3Ds (nombre d'utilisateurs, fréquence d'observation, âge des utilisateurs, domaines concernés, etc.) en comparaison notamment de l'usage de contenu monoscopique.

Par ailleurs, l'état de l'art des technologies 3Ds présente uniquement les dispositifs largement commercialisés. Les technologies en développement, éventuellement en usage dans le futur, comme par exemple celles basées sur l'holographie, ne sont pas présentées.

Ce rapport expose également les règles de conception de contenu 3Ds qui peuvent être appliquées pour améliorer le confort visuel dans les différents domaines d'usage. Ces règles, employées aujourd'hui par les professionnels en 3Ds, n'ont pas été discutées et validées par le groupe de travail et ne doivent pas être perçues comme des recommandations préconisées par l'Anses. Par ailleurs, le rapport n'a pas pour objectif de présenter toutes les autres règles techniques et (ou) artistiques utilisées en 3Ds pour la bonne réalisation d'un contenu en relief.

1.3 Modalités de traitement :

Le Conseil scientifique de l'Anses a donné un avis favorable, le 14 novembre 2011, à l'auto-saisine de l'Anses sur la question des impacts sanitaires des technologies audiovisuelles en 3Ds. L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette auto-saisine. Sur avis du CES, l'Agence a également mandaté un groupe de travail « 3Ds » pour cette instruction. Ce groupe de travail a été constitué, à la suite d'un appel à candidatures public ouvert du 19 décembre 2011 au 1^{er} février 2012, d'experts en ophtalmologie, en ophtalmologie pédiatrique, en orthoptie, en sciences cognitives et d'experts physiiciens en technologies 3Ds.

Le groupe de travail coordonné par l'Anses s'est réuni à 13 reprises en sessions plénières, du 16 avril 2012 au 16 janvier 2013. Le groupe de travail a par ailleurs sollicité l'audition d'experts

scientifiques nationaux, internationaux et de représentants de fédérations et syndicats professionnels de la 3Ds afin d'obtenir toutes les informations pertinentes pour répondre à cette auto-saisine. Pour réaliser cette expertise, le groupe de travail s'est appuyé sur une large revue de la littérature scientifique internationale complétée par des auditions de personnalités scientifiques.

L'analyse bibliographique entreprise par le groupe de travail « 3Ds » a été aussi exhaustive que possible. Les travaux scientifiques pris en compte dans le rapport sont issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones à comité de lecture.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES. Les travaux d'expertise ont été adoptés par le CES le 10 février 2014.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

2 Introduction sur l'interfaçage visuel

L'observation d'un monde réel filmé ou d'un monde virtuel représenté par des images de synthèse pose le problème de leur restitution tridimensionnelle. Celle-ci se fait par un moyen technologique : une interface visuelle composée d'un ou de plusieurs écrans bidimensionnels¹⁵. Les images sont observées en vision monoscopique (même image pour les deux yeux de l'observateur) ou en vision stéréoscopique (images différentes pour les deux yeux de l'observateur) pour exploiter la vision binoculaire. À noter que le terme « 3D » est ambigu. Souvent utilisé à la place de « 3D stéréoscopique », il peut aussi décrire des images de synthèse présentées de façon monoscopique pour peu que celles-ci aient été calculées de façon à présenter des indices de profondeur tels que perspective ou ombrages. Cela a été particulièrement vrai au début de l'essor de l'infographie et des jeux vidéo, lorsque la puissance informatique a permis de créer des jeux gérant les déplacements et changements de point de vue en trois dimensions (jeux vidéo 3D). Pour éviter les ambiguïtés, nous parlerons dans ce rapport de « 3Ds » lorsque la restitution de l'information tridimensionnelle se fait par une interface stéréoscopique.

L'exploitation d'une interface visuelle, le moyen technologique permettant une représentation tridimensionnelle stéréoscopique, ne peut être étudiée que dans le cadre plus global de l'interfaçage visuel, prenant en compte toute la chaîne de la création des images jusqu'à leur perception par le cerveau de l'observateur. La conception et la réalisation des images sont basées sur différents concepts, comme la représentation en perspective de l'espace tridimensionnel (projection 3D sur un plan 2D), la perception de la profondeur par la vision binoculaire, *etc.* La conception des images stéréoscopiques dépend de l'interface visuelle employée mais aussi des capacités visuelles de l'observateur, qui sont variables d'un individu à l'autre (certaines personnes sont physiologiquement incapables d'interpréter la notion de profondeur). Il est donc nécessaire, pour le réalisateur de film (images réelles) ou pour l'infographiste (images de synthèse) de respecter certaines règles de conception, en fonction des contraintes techniques de l'interface visuelle et des capacités perceptives de l'observateur. Réciproquement, la vision humaine étant un sens actif, le changement de point de vue de l'observateur (mouvement de sa tête et (ou) de ses yeux) peut être pris en compte pour améliorer, soit la création des images stéréoscopiques, soit leur restitution *via* l'interface visuelle. Le schéma de la Figure 1 résume ces notions d'interfaçage visuel.

Les images peuvent être conçues en temps réel (réalité virtuelle, jeux vidéo, diffusion en direct à la télévision, *etc.*) ou en temps différé (cinéma, diffusion télévisée en différé, *etc.*).

¹⁵ Les dispositifs créant matériellement des images volumiques, prototypes d'usage très limité, ne seront pas décrits.

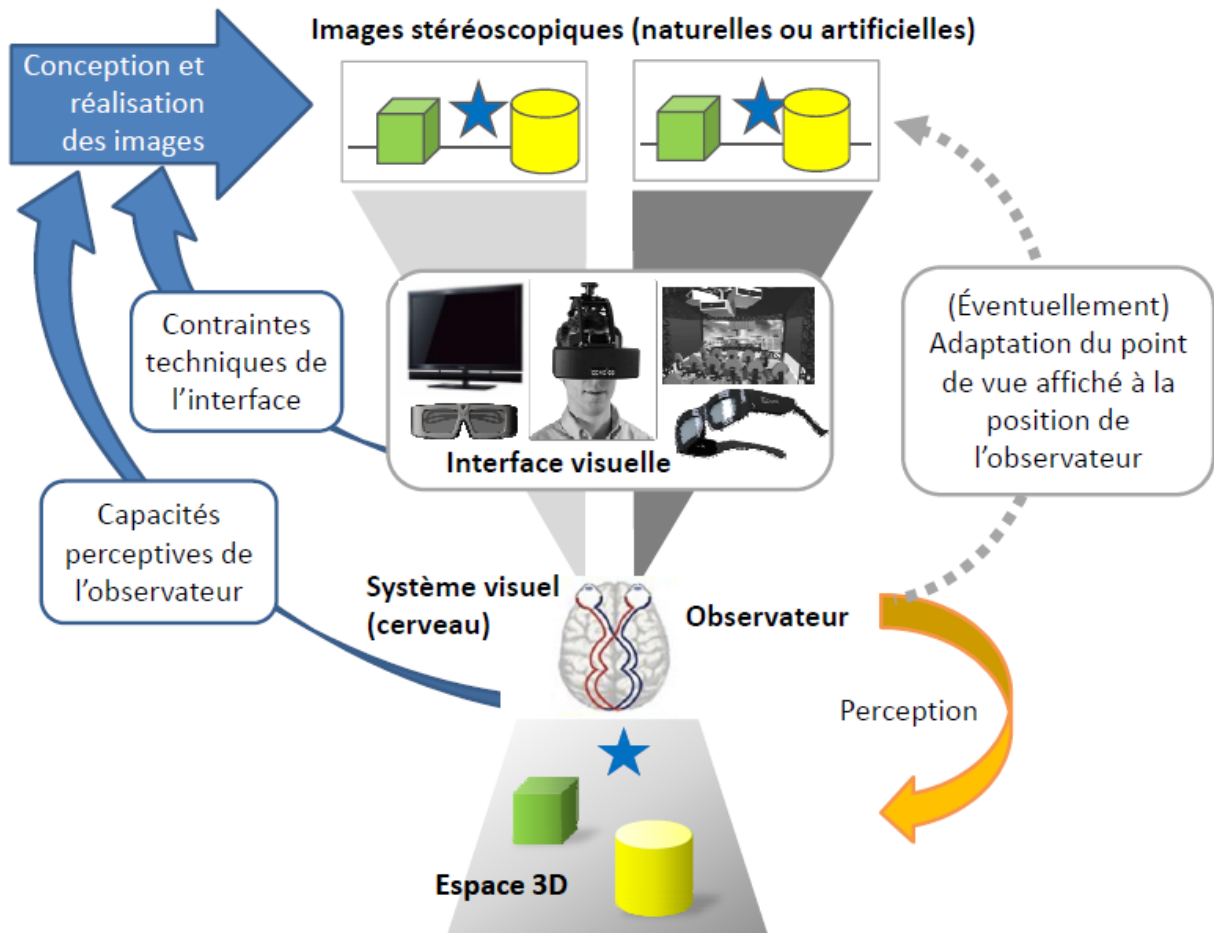


Figure 1 : schéma récapitulatif de l'interfaçage visuel

- flèche jaune pour la perception visuelle d'un espace tridimensionnel *via* le moyen technologique employé ;
- flèches bleues pour la prise en compte des contraintes techniques de l'interface visuelle et des capacités perceptives de l'observateur, lors de la conception des images stéréoscopiques ;
- flèche grise en pointillés pour la prise en compte éventuelle des mouvements de la tête et des yeux de l'observateur.

3 Bases physiologiques de la perception tridimensionnelle

L'objet de ce chapitre est de préciser de quelles façons l'homme perçoit la profondeur, la troisième dimension de l'espace, et d'éclaircir deux notions souvent confondues : la perception visuelle de la profondeur d'une part et la vision en relief ou stéréoscopique d'autre part.

Au stade précoce du traitement visuel, la décomposition et le traitement de l'information visuelle par différents canaux permettent d'utiliser une série variée d'indices pour la perception de l'espace tridimensionnel, donc de la profondeur. Ces indices se décomposent en deux grandes catégories :

- les indices de commandes oculomotrices centrales et les indices proprioceptifs (dus aux actions des muscles extra-oculaires et ciliaires), composés de l'accommodation et de la vergence¹⁶ imbriqués avec des mouvements directionnels, les saccades ; ces indices sont fiables à faible distance (quelques mètres) ;
- les indices visuels, composés des indices binoculaires et des indices monoculaires.

Les indices proprioceptifs - accommodation et vergence - sont ajustés par le système visuel. C'est déjà par la valeur de commande des muscles oculomoteurs de l'orbite et du corps ciliaire et de l'iris que le cerveau a une perception proprioceptive de la profondeur de l'objet observé. Rappelons que la vision naturelle humaine est une vision active. Les yeux sont presque toujours en mouvement pour observer l'environnement, et les cristallins se déforment pour permettre l'accommodation.

La perception de l'espace tridimensionnel, de la profondeur, sera explicitée en détail dans le paragraphe 3.2.

3.1 La vision humaine

3.1.1 Physiologie de la vision

3.1.1.1 Introduction

L'œil est un organe complexe. Il est possible de faire le lien avec une caméra vidéo qui reprend en partie certaines fonctionnalités de l'œil et du système visuel.

L'œil et la caméra vidéo sont similaires sur plusieurs points. L'œil comporte :

- un système optique, comparable à un objectif, au sein duquel le cristallin permet l'accommodation (c'est-à-dire la mise au point pour l'appareil photographique) sur un élément de la scène visuelle regardée. La plupart du temps, cette accommodation est effectuée de manière automatique (l'autofocus pour l'appareil photographique), grâce à un contrôle cérébral permettant de préserver la netteté de l'image regardée ou perçue ;

¹⁶ Vergence : mouvement des deux yeux dans lequel les axes visuels cessent d'être parallèles ; ils peuvent se rapprocher (vergence) ou s'éloigner (divergence) de façon à ajuster l'angle des axes optiques en fonction de la profondeur de l'objet fixé. Il y a vergence pour un objet proche et il y a divergence pour un objet lointain.

- une pupille, analogue à un diaphragme, dont le diamètre s'adapte à l'ambiance lumineuse mais aussi au degré d'accommodation ;
- la rétine, qui peut être considérée comme l'homologue d'une matrice de capteurs puisqu'elle assure la capture des images. Elle en diffère puisqu'elle effectue également un premier traitement de l'information visuelle. La rétine permet notamment d'adapter le flux lumineux entrant dans l'œil en participant au contrôle du diamètre pupillaire et de moduler la sensibilité rétinienne pour s'adapter à l'ambiance lumineuse. La composition de la rétine n'est pas homogène : sa portion centrale est dédiée à la détection fine alors que sa partie périphérique l'est à la détection des objets en mouvement, sans qu'ils soient nécessairement identifiés.

Globalement, le système visuel est un sens actif : il va chercher dynamiquement les informations visuelles.

L'œil est relié au système nerveux qui assure le traitement de l'information visuelle par le nerf optique, véritable chaîne comportant plusieurs canaux pour véhiculer les différents paramètres visuels (contraste, luminance, mouvement / vitesse, couleurs, *etc.*).

Le système nerveux reçoit ces différents paramètres visuels qu'il traite séparément au niveau d'aires corticales distinctes et spécifiques. Le premier temps de ce traitement consiste en la transformation de chacun des paramètres visuels monoculaires en provenance de chaque œil en paramètres binoculaires au niveau de l'aire visuelle primitive (appelée aire visuelle striée ou V1). Au terme de ce traitement, les processus cognitifs permettent la « compréhension » de la scène visuelle, mais également la mise en œuvre des réponses motrices et oculomotrices, automatiques ou volontaires, destinées à améliorer la mise au point et l'orientation du regard sur un élément de la scène visuelle.

Le déclenchement de l'accommodation est souvent lié à celui de la vergence, puisqu'il existe une triade syncinétique associant ces deux phénomènes et la survenue d'un myosis (réduction de la taille de la pupille). Cette triade est mise en jeu lorsque l'objet regardé se rapproche. Il est cependant possible de mettre en jeu isolément accommodation et vergence.

3.1.1.2 Rappels sur l'anatomie de l'œil humain :

L'œil a la forme d'un globe, expliquant le nom de globe oculaire qui lui est donné (*cf.* Figure 2). Cet œil comporte trois tuniques externes, la sclère, l'uvée et la rétine qui entourent trois milieux transparents internes, l'humeur aqueuse, le cristallin et le vitré. Une description plus détaillée de ces différents éléments se trouve en annexe de ce rapport (*cf.* Annexe 2). La description du cristallin et de la rétine est détaillée ci-dessous.

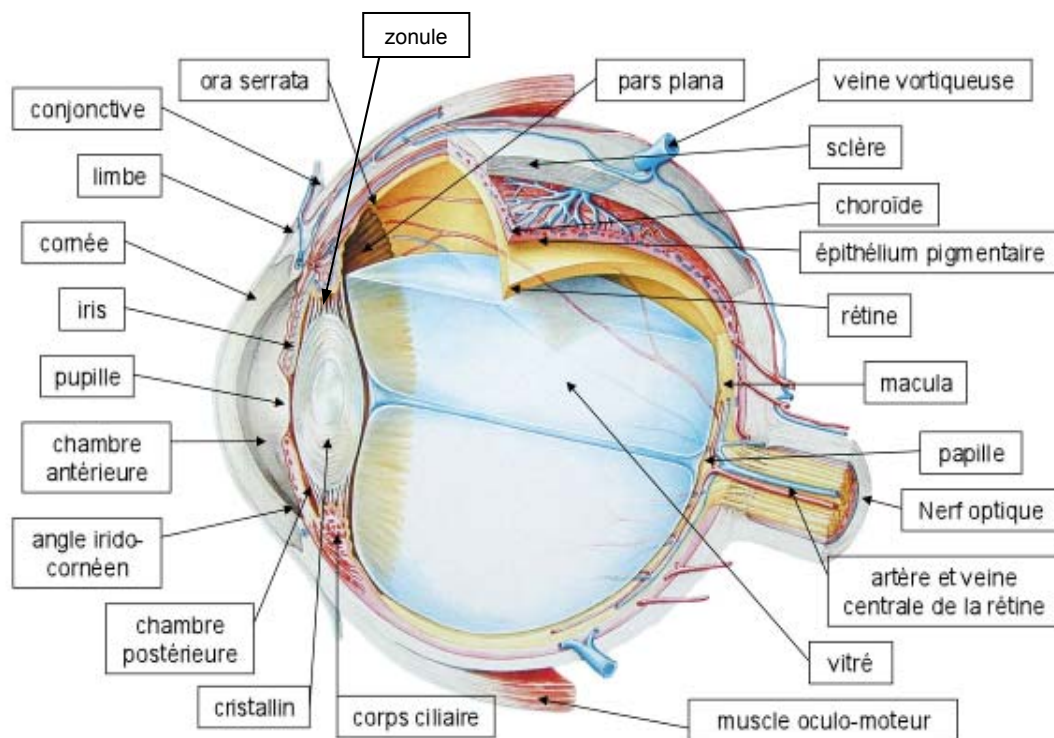


Figure 2 : anatomie de l'œil humain

3.1.1.3 Le cristallin :

Le cristallin est une lentille biconvexe transparente, ni innervée ni vascularisée, située entre l'iris et le vitré. Il est amarré au corps ciliaire et maintenu en place par les fibres de la zonule. La zonule est le « système d'amarrage » du cristallin. Elle constitue un ensemble de fibres radiées formant un triangle à sommet ciliaire (au niveau des procès ciliaires) et à base cristallinienne. Ces fibres, très entrecroisées, avec de multiples faisceaux, transmettent au cristallin les contractions du muscle ciliaire.

La principale propriété du cristallin réside en sa capacité à se déformer en fonction des tractions qu'exerce sur lui le muscle ciliaire. Les modifications de contraction de ce muscle ciliaire entraînent des variations des rayons de courbure du cristallin. Il en résulte des changements du pouvoir de focalisation de l'œil : l'objet focalisant sur la rétine pouvant ainsi se trouver à des distances variables : c'est l'accommodation.



Figure 3 : accommodation pour un objet à l'infini (figure de gauche) et un objet proche (à droite)

3.1.1.4 La rétine

La rétine est la tunique la plus interne de l'œil (voir le schéma descriptif de la structure de la rétine en Figure 4). Ce tissu comporte deux feuillets : la rétine neurale et l'épithélium pigmentaire rétinien, séparés par un espace virtuel. La rétine est constituée de 10 couches. Les quatre couches les plus externes sont dites « réceptrices », les six suivantes, plus internes, sont dites « transmettrices ». Elles assurent également une première analyse du message visuel.

En nasal du pôle postérieur de l'œil, légèrement en dessous du méridien horizontal, il existe un disque discrètement ovoïde à grand axe vertical d'où émergent les artères et veines rétinienne. Cette zone constitue la papille ou tête du nerf optique. Elle ne comporte aucune cellule photoréceptrice. Elle est constituée des axones des cellules ganglionnaires formant le nerf optique.

Le pôle postérieur de l'œil correspond à la région maculaire (la macula), région particulière de la rétine, tant d'un point de vue fonctionnel qu'histologique. Cette région maculaire, zone avasculaire, a pour centre la fovéola, elle-même entourée par la fovéa. La coloration de la fovéa peut être légèrement différente de celle du reste de la rétine, du fait d'un pigment jaunâtre. Pour comprendre l'importance de cette région rétinienne dans la physiologie de la vision et de la vision binoculaire, il faut d'abord évoquer la répartition des photorécepteurs au niveau rétinien.

Les photorécepteurs sont les cellules chargées d'assurer la transformation de l'énergie lumineuse, qui arrive sous forme de photons, en influx nerveux. Cette transformation, appelée « cascade de la transduction visuelle » ou phototransduction, s'effectue au niveau des segments externes des photorécepteurs, où se trouvent les pigments visuels. La transduction visuelle suit des mécanismes proches quel que soit le type de photorécepteur. Celle-ci aboutit à une hyperpolarisation graduée en fonction de l'intensité lumineuse au niveau de l'ensemble du photorécepteur et au départ d'un potentiel d'action lorsqu'un seuil est atteint. Cette cascade de la transduction visuelle est associée à une forte consommation énergétique.

Il faut noter que les photorécepteurs, et plus encore leurs segments externes, sont localisés à la partie externe de la rétine. La lumière doit donc traverser, outre les milieux transparents de l'œil, toute l'épaisseur de la rétine avant de les atteindre.

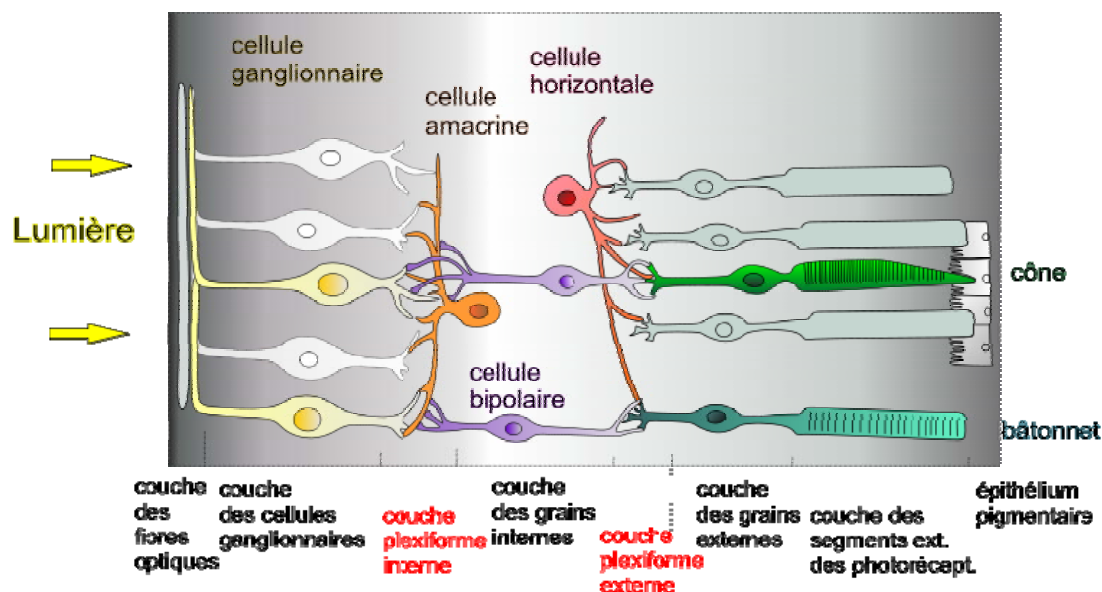


Figure 4 : schéma présentant la structure de la rétine

Le lecteur trouvera des informations supplémentaires concernant la physiologie de l'œil dans l'Annexe 2.

3.1.2 L'accommodation

3.1.2.1 Mécanismes optiques permettant de jouer sur la distance

Le système optique de l'œil humain est très imparfait du fait du grand nombre de milieux et d'interfaces qui le composent, il génère ainsi différents types d'aberrations optiques. Celles qui sont dites de haut degré sont spécifiques à chaque personne et ne peuvent être corrigées par les

systèmes optiques traditionnels, puisqu'elles présentent des variations temporelles rapides (> 10 Hz) [Atchison, 2000]. Leur retentissement varie en fonction du diamètre pupillaire, mais l'aberration induite par la taille de la pupille elle-même intervient peu sur l'accommodation. L'aberration chromatique liée aux changements d'indices de réfraction des structures intra oculaires en fonction de la longueur d'onde du rayon incident joue également un rôle non négligeable, atteignant 2,5 D (dioptries) sur l'étendue du spectre visible [Wald et Griffin, 1947]. Toutes ces aberrations chromatiques et sphériques participent aux mécanismes d'étalement axial de l'image. Cet étalement axial de l'image permet d'obtenir une réponse intermédiaire du système accommodatif entre la position de repos et la focalisation précise du *stimulus* par des phénomènes purement optiques. Il intervient en quelque sorte comme un moyen « d'économiser » ou de « s'affranchir » de l'accommodation mettant en jeu la contraction du muscle ciliaire et la déformation du cristallin.

3.1.2.2 Accommodation au sens strict :

Physiologie

L'accommodation met en jeu deux composantes différentes (composante musculaire et composante fibro-élastique). Il s'agit tout d'abord d'une composante musculaire, puisque ce mécanisme permettant la vision nette quelle que soit la distance de l'objet regardé repose sur l'action du muscle ciliaire. Lors de leur contraction par stimulation parasympathique, les fibres circulaires du muscle de Rouget-Müller réduisent le diamètre de l'orifice qu'elles circonscrivent, ce qui provoque un relâchement de la zonule et une augmentation de puissance du cristallin. Le système orthosympathique agit sur les fibres longitudinales du muscle de Brucke. Son action, prédominante sur la position antéro-postérieure du cristallin, accélérerait la remise en tension de la zonule. Ce système a donc plutôt un rôle musculaire antagoniste au système parasympathique qu'une action motrice indépendante. De fait, la part réelle de l'activation orthosympathique ou de la diminution d'activité parasympathique dans la diminution d'accommodation reste l'objet de discussions. La seconde composante est fibro-élastique, constituée par le cristallin, sa capsule et la zonule. Le rôle du cristallin consiste à focaliser l'image d'un point objet sur la rétine. Pour ce faire, il est capable de modifier sa forme et donc son pouvoir réfractif pour s'adapter aux variations de distance de ce point objet. Par mémoire de forme, le cristallin est capable de reprendre sa morphologie initiale lors du relâchement de la zonule [Slingsby et Bax, 1989]. Lors de ce relâchement, la déformation de la capsule antérieure entraîne une diminution du rayon de courbure. Cette déformation diffère chez l'enfant par rapport à l'adulte du fait des variations de consistance du noyau cristallinien avec l'âge. La souplesse du noyau cristallinien de l'enfant provoque une déformation sphérique de la capsule antérieure alors qu'elle est conoïde chez l'adulte [Brown, 1973]). La zonule transmet immédiatement l'action motrice au cristallin.

Innervation

Les *stimuli* déclenchant l'accommodation suivent deux voies différentes. Une part des informations emprunte les voies optiques jusqu'au cortex au niveau duquel elles sont traitées. Une autre part quitte la voie optique avant les corps genouillés latéraux pour gagner directement la région du tectum, dans la partie postéro-supérieure du mésencéphale et, de là, le noyau d'Edinger Westphal, origine réelle du nerf moteur parasympathique destiné à l'œil. Ce nerf moteur parasympathique constitue le contingent intrinsèque du nerf moteur oculaire (ou 3ème paire de nerfs crâniens). L'innervation qui participe, en partie, à la diminution de puissance de l'œil est plus complexe. Le centre supérieur de commande est situé au niveau de l'hypothalamus qui envoie des fibres jusqu'au niveau de la substance grise de la moelle cervico-dorsale (C8 -D1). L'influx moteur suit la chaîne latéro-vertébrale et passe par le ganglion cervical supérieur avant de rejoindre la carotide interne. L'innervation orthosympathique rejoint l'œil par plusieurs nerfs (nerfs ciliaires longs et courts).

Boucle de contrôle et rôle des structures nerveuses centrales

La vision dans son sens large est impliquée de façon indirecte dans la « mécanique » accommodative. La qualité de l'image projetée sur la rétine est dépendante de l'accommodation et, à l'inverse, ce sont les défauts de projection de l'image sur la rétine qui déclenchent la réponse accommodative et sa régulation [Denieul, 1982]. Ce système interdépendant crée des boucles de contrôle. Le déclenchement du réflexe accommodatif et son réglage se font par la perception de cercles de diffusion par la rétine, ou, plus simplement, par le flou que le système ressent et qui ne lui permet pas d'identifier correctement l'objet regardé. C'est la fovea qui induit le processus. Un *stimulus* intervenant à plus de 5° de la fovéa n'entraîne pratiquement aucune réponse accommodative. Pour cette raison, en vision scotopique, la mise au point oculaire est très imprécise, puisque la macula est aveugle la nuit. Ainsi, il apparaît que l'accommodation est provoquée par la nécessité de modifier la puissance dioptrique de l'œil pour améliorer la focalisation sur la rétine de l'image d'un objet situé à une distance déterminée. Cette régulation repose sur une boucle de contrôle qui compare le signal reçu et le signal théoriquement optimum après une légère modification du système. Ce mécanisme consiste à exagérer l'accommodation puis inhiber l'influx de contrôle jusqu'à obtenir l'image la plus parfaite possible, et ainsi de suite. L'enrichissement accommodatif s'arrête lorsque l'enrichissement en détails fins ne peut plus être obtenu. Ce rétrocontrôle est donc négatif et antagoniste [Goubel, 1981]. La taille de la pupille interviendrait dans le déclenchement de l'accommodation : lorsque la mydriase provoquée par les conditions d'éclairage et des variations anatomiques individuelles est trop importante, la boucle accommodative ne peut apparaître ([Hennessy *et al.*, 1976] ; [Ward *et al.*, 1987]). L'existence de cette boucle de contrôle permet de comprendre la survenue de microfluctuations de l'accommodation. Celles-ci sont la conséquence des tests de netteté que le système réalise en permanence et qui font constamment varier la réfraction. Ces fluctuations quasiment permanentes dépendent beaucoup des conditions de stimulations. Ainsi, elles se réduisent nettement lorsque la qualité de l'image est la meilleure. À l'inverse, dans le cas d'une amblyopie, le système visuel est beaucoup moins performant et l'image perd en netteté. C'est pourquoi l'amplitude des microfluctuations d'accommodation augmente proportionnellement à la profondeur de la baisse visuelle [Ciuffreda et Hokoda, 1983]. L'amplitude moyenne de ces microfluctuations est de 0,10 D et leur fréquence moyenne de 2 Hz. Mais, selon les conditions de stimulation, leur amplitude va de 0 à 0,25 D pour des fréquences comprises entre 0 et 5 Hz. Cette amplitude augmente avec l'effort accommodatif ([Campbell *et al.*, 1969] ; [Arnulf et Dupuy, 1960] ; [Denieul, 1982]). Elle est maximale lors d'une accommodation située dans le milieu du parcours accommodatif mais diminue dans les zones extrêmes. La fréquence des microfluctuations d'accommodation diminue avec l'âge, notamment lors de l'apparition de la presbytie, indépendamment de l'amétropie du sujet considéré. Par contre, l'amplitude n'est pas sensible à l'âge [Arnulf et Dupuy, 1960].

En plus du besoin de « voir net », d'autres stimulations font varier la puissance de l'œil. Il s'agit en premier lieu de la vergence : tout effort de vergence stimule l'accommodation. Celle-ci peut toutefois ne pas répondre immédiatement à ce *stimulus* oculomoteur s'il y a contradiction entre la stimulation provoquée par la vergence et l'information issue de la rétine quant à la netteté de l'image. L'exemple classique est celui du myope qui lit sans ses lunettes et converge sans accommoder. Un sujet normal accommode quelques centièmes de secondes après que la vergence a commencé à agir. En fonction de l'image rétinienne, son accommodation peut ensuite se relâcher ou perdurer.

De nombreux centres corticaux participant au traitement de l'information visuelle sont susceptibles de jouer un rôle dans la mise en jeu de l'accommodation. Au moins 19 de ces unités corticales ont été décrites chez le chat [Bando *et al.*, 1984, 1991]. De plus, deux centres principaux ont été identifiés, qui participent à une réponse accommodative active. Le premier est situé dans l'aire V1 du lobe occipital. Son fonctionnement réflexe est indépendant de la perception consciente. Il reçoit et décompose l'information de l'image fovéale en tenant compte de facteurs extraoculaires comme la proprioception ou l'équilibre [Markham *et al.*, 1973]. Le second centre est volontaire et situé au niveau du lobe frontal.

Le système visuel s'adapte à la distance de l'objet à regarder. Notamment lorsque l'objet se rapproche, ou donne la sensation de se rapprocher, trois phénomènes physiologiques sont mis en jeu de manière synergique, réalisant une syncinésie. Il s'agit de l'accommodation, de la vergence et du myosis. Ces trois phénomènes sont interdépendants. L'accommodation joue un rôle dans la netteté de l'image. Le myosis modifie la profondeur de champ. Cette fermeture du diaphragme irien améliore la précision visuelle en éliminant les rayons lumineux obliques parasites (effet sténopéique). La vergence a surtout un rôle dans la vision binoculaire en maintenant la correspondance rétinienne des deux yeux sur le point observé qui se rapproche. Sa valeur est corrélée à l'intensité d'accommodation sollicitée pour la vision correspondante. C'est le rapport de la vergence accommodative à l'accommodation ou AC/A. Celui-ci évalue la quantité d'effort du muscle ciliaire nécessaire pour provoquer une unité d'accommodation. Il est donc proportionnel à l'effort de contraction du muscle ciliaire. Ce rapport diminuant avec l'âge, le muscle ciliaire doit dans ces conditions fournir un effort plus important.

3.1.3 Notions de champ du regard et champ visuel

Il est possible de déterminer plusieurs portions de l'espace que peut percevoir une personne selon les conditions dans lesquelles cette mesure est effectuée.

3.1.3.1 Champ visuel monoculaire

Le champ visuel monoculaire est la projection de l'ensemble des points de l'espace vus par un œil immobile, fixant droit devant lui, en position dite primaire et tête immobile. Bien qu'étant par définition un cône de révolution, le champ visuel est représenté sur une section plane perpendiculaire à l'axe optique. Il permet d'établir les limites périphériques de ce que cet œil peut percevoir, et, à l'intérieur de cette surface, les variations de la sensibilité rétinienne qui augmente de la périphérie vers le centre. Les 1°30" centraux correspondent à la vision obtenue par la fovéola. La macula permet la vision des 20 degrés centraux.

Normalement, le champ visuel d'un œil adulte s'étend jusqu'à 60° en haut, 80° en bas, 90° en temporal, et seulement 60° en nasal du fait de la présence de la pyramide nasale. Ce champ visuel présente une zone aveugle, la tache de Mariotte, qui est située entre 15 et 20° en temporal du point de fixation central et entre 5° au dessus et 15° en dessous de l'axe horizontal. Cette zone correspond à la projection de la papille optique dépourvue de photorécepteur. Par des mécanismes de compensation, il n'est pas possible normalement de prendre conscience de la présence de ce scotome. Ces valeurs sont obtenues très précocement et il est admis qu'elles peuvent être retrouvées dès l'âge d'un an chez le jeune enfant. Néanmoins, un enfant à cet âge n'a pas les capacités lui permettant de « comprendre » et « d'interpréter » ce qu'il voit dans son champ visuel.

Le champ visuel est sensible à la fatigue et à la prise de substances stimulantes ou, au contraire, de substances diminuant la vigilance.

3.1.3.2 Champ visuel binoculaire

Il représente la projection de l'ensemble des points de l'espace vus par les deux yeux, ceux-ci étant immobiles, fixant en position dite primaire et tête immobile. L'étendue latérale de ce champ visuel binoculaire est au total de 180°. En effet, les champs visuels monoculaires de chaque œil se superposent en partie, au moins dans une région centrale de 120° environ. Néanmoins, il existe une zone de vision monoculaire de 20 à 25° de part et d'autre.

L'existence de ce champ visuel binoculaire présente plusieurs intérêts. Il rend possible une vision binoculaire dans une région étendue et permet de compenser les déficits existant dans chaque champ visuel monoculaire.

3.1.3.3 Champ oculomoteur

Il est possible de mesurer la projection de l'ensemble des points de l'espace vus par chaque œil séparément ou par les deux yeux ensemble lorsque ceux-ci peuvent bouger, la tête restant fixe. Cette mesure n'est utile que pour la conception d'interfaces visuelles, telles que les visiocasques. Elle n'a pas d'intérêt clinique et n'est pas « écologique » puisqu'elle ne correspond pas aux situations de la vie courante.

3.1.3.4 Champ du regard

Il s'agit de la mesure de la projection de l'ensemble des points de l'espace vus par les deux yeux ensemble lorsque ceux-ci et la tête peuvent bouger. Il s'agit donc de la mesure de l'espace perçu dans la vie courante.

L'existence de ce champ du regard permet de déplacer l'axe optique de chaque œil vers la scène d'intérêt, même si celle-ci est très latéralisée par rapport à la position initiale du sujet. Elle permet ainsi de déplacer la zone de superposition du champ visuel de chaque œil, et, par voie de conséquence, la zone de vision binoculaire vers cet objet périphérique.

3.2 Perception de l'environnement naturel en trois dimensions

3.2.1 Perception de la profondeur par indices monoculaires

Il faut d'abord bien comprendre que la perception de la profondeur d'un environnement tridimensionnel ne découle pas seulement de la vision binoculaire. Il est possible d'appréhender la troisième dimension avec seulement un œil grâce à des indices dits monoculaires. C'est l'expérience visuelle acquise dès le plus jeune âge et lors du développement physiologique qui nous permet d'interpréter ces indices et d'en déduire des notions de profondeur. Les indices monoculaires peuvent être classés de la façon suivante :

3.2.1.1 Ombres et lumière

Les variations de lumière et les ombres sur les objets dépendent de l'orientation des différents éléments de l'objet par rapport à une source de lumière. Elles fournissent donc une information sur la forme tridimensionnelle de ceux-ci (Figure 5).

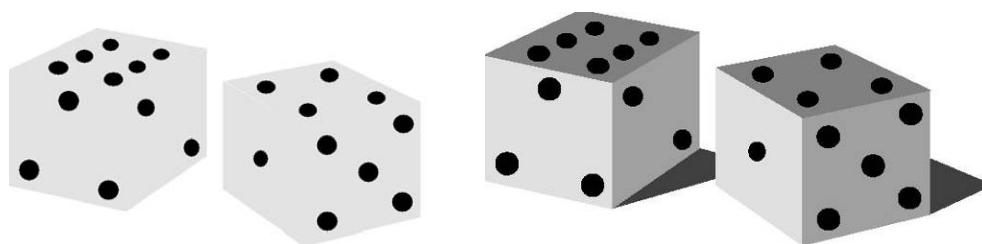


Figure 5 : les variations de lumière et les ombres augmentent le « relief »

3.2.1.2 Dimensions relatives

Chaque objet projette au fond de l'œil une image dont les dimensions sont proportionnelles à celles de l'objet et décroissantes en fonction de la distance de l'objet par rapport à l'œil. Le cerveau connaît les dimensions familières des objets réels. Il peut donc en déduire leurs distances approximatives. L'estimation de profondeur est facilitée pour une série d'objets, réels ou imaginaires, de formes identiques : ils sont *a priori* perçus de taille identique et leur distance dans un espace 3D est estimée en fonction de la taille projetée au fond de l'œil. Dans la Figure 6, les 4 roses sont perçues à différentes profondeurs car elles sont considérées de même taille. La hauteur des roses dans l'image contribue également à la sensation de profondeur.



Figure 6 : perception de la profondeur par la taille relative

3.2.1.3 Hauteur relative dans le champ de vue

En général, plus un objet posé au sol est éloigné, plus il apparaît en hauteur (proche de l'horizon) dans notre champ de vue. La position des objets par rapport à cette ligne horizontale, qui traverse le champ visuel, peut donc être considérée comme un indice de profondeur.

3.2.1.4 Interposition ou occultation

Un objet peut cacher partiellement un autre objet placé derrière lui, ce qui permet de positionner relativement ces objets en profondeur. La forme gris foncé de la Figure 7 est perçue comme un rectangle en partie masqué par une ellipse, et donc situé derrière elle. Notre expérience visuelle nous entraîne à percevoir une ellipse devant un rectangle plutôt que deux formes adjacentes sur un même plan.

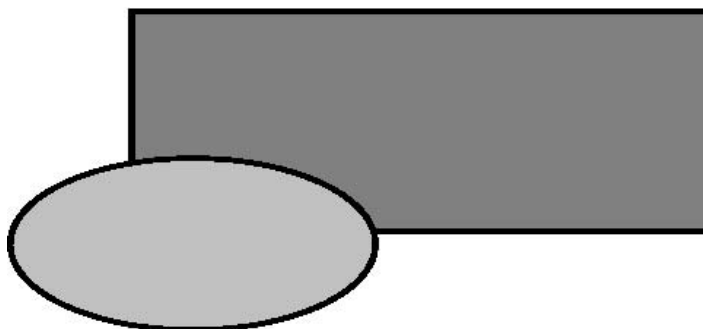


Figure 7 : perception de la profondeur par interposition

3.2.1.5 Gradient de la texture d'une surface

La texture d'une surface est perçue d'autant plus dense qu'elle est plus éloignée de l'œil. La variation apparente de densité (le gradient de la texture) donne une information complémentaire de profondeur (voir la Figure 8).



Figure 8 : impression de profondeur par différences de densité des éléments d'une image

3.2.1.6 Variation de visibilité dans une scène extérieure

La visibilité d'une scène extérieure est décroissante en fonction de l'épaisseur de la couche atmosphérique, donc de la profondeur (Figure 9).



Figure 9 : variation de la visibilité dans une scène extérieure

3.2.1.7 Parallaxe due aux mouvements

Quand un observateur se déplace, les mouvements relatifs des différents éléments de la scène visuelle dépendent des distances de ces éléments par rapport à l'observateur. La Figure 10 présente la parallaxe de mouvement illustrée par le flou de bougé sur une image prise en voiture : lorsque l'œil fixe le bosquet du fond, la vitesse apparente des herbes du premier plan est plus importante que celle des arbres du second plan, elle-même plus grande que celle du fond.



Figure 10 : parallaxe de mouvement illustrée par le flou de bougé.

Réciproquement, quand des objets se déplacent à vitesse réelle égale, leur vitesse apparente est d'autant plus élevée qu'ils sont proches de l'observateur.

3.2.1.8 Perspective

La perspective est un moyen très efficace pour faire percevoir le monde en relief sur un écran monoscopique. Elle est employée en peinture depuis l'époque de la Renaissance pour visualiser sur une surface plane l'espace tridimensionnel (cette règle de représentation de la profondeur repose aussi sur les indices de taille et de hauteur). Il existe plusieurs types de perspectives : cavalière, géométrique, photographique, artistique. La perspective cavalière est utilisée en dessin industriel. Elle est plus éloignée de la vision réelle que la perspective photographique, mais plus facile à réaliser à la main. Il n'y a pas de point de fuite (pas de variation de taille avec la profondeur), mais des lignes « fuyantes » parallèles (un pur effet de hauteur), comme sur la Figure 11, où l'on perçoit deux parallélépipèdes et non un ensemble de lignes sur une feuille plane.

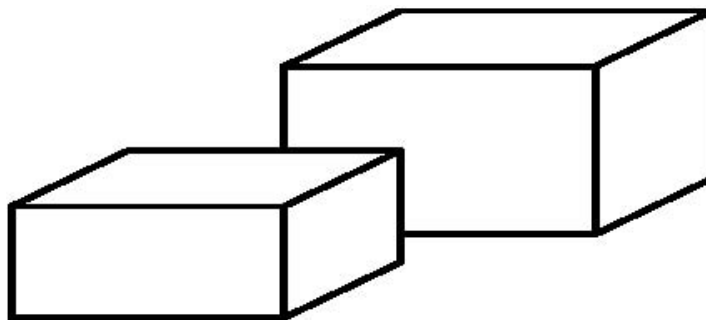


Figure 11 : perception de la profondeur par la perspective

3.2.2 Accommodation du cristallin pour la vision stéréoscopique

L'accommodation est la capacité de l'œil à modifier la courbure de son cristallin afin d'obtenir l'image la plus nette possible sur la rétine. Lorsqu'un objet est situé à l'infini, l'œil est à l'état de repos, c'est-à-dire que le cristallin n'accommode pas. Lorsque l'œil voit un objet proche, le cristallin augmente sa courbure pour permettre la focalisation de l'image sur la rétine. La Figure 3 montre la courbure du cristallin en fonction de la distance de l'objet observé : plus l'objet est proche, plus le cristallin se bombe pour obtenir une image nette.

La vergence et l'accommodation sont liées. L'accommodation entraîne la vergence et réciproquement. Si on force une personne à accommoder, elle aura tendance à converger. Inversement, si on force une personne à converger, elle aura tendance à accommoder.

Cette relation est plus ou moins forte suivant les personnes. Pour jauger le lien entre l'accommodation et la vergence chez une personne, on mesure le rapport AC/A qui donne la quantité de vergence accommodative pour une dioptrie d'accommodation. Pour la mesurer, on force la personne à accommoder (facteur A) et on mesure la vergence accommodative (facteur AC) obtenue. Le rapport obtenu est compris en moyenne entre 3 et 4, mais il est variable d'une personne à l'autre.

On sait qu'un appareil photographique observe en vision passive l'environnement réel, à l'inverse de la vision humaine. Mais on peut néanmoins exploiter la profondeur de champ de toute image photographique : c'est un indice de profondeur qui correspond partiellement au phénomène d'accommodation. On peut donc utiliser des effets de profondeur de champ sur des images de synthèse pour donner plus de « relief » à l'espace observé.

3.2.3 Perception de la profondeur en vision binoculaire

3.2.3.1 Introduction

La vision binoculaire constitue un raffinement fondamental de la fonction visuelle, d'apparition tardive dans l'évolution des espèces, permettant au système nerveux central d'utiliser et d'intégrer les images provenant de chaque œil. Cette vision binoculaire comporte plusieurs degrés, allant de la vision simultanée (1^{er} degré), à la fusion (2^{ème} degré) et à la vision stéréoscopique (3^{ème} degré). Néanmoins, la vision stéréoscopique pourrait constituer une forme spécifique de vision binoculaire, basée sur des capacités du système visuel différentes de la fusion.

L'existence de facteurs anatomiques et moteurs spécifiques est indispensable pour que puisse apparaître une vision binoculaire. Il est d'une part indispensable que les deux yeux aient une acuité visuelle satisfaisante sans anisométrie importante, source d'anisiconie. L'existence de cette vision binoculaire nécessite également l'existence d'une héli-décussation des voies optiques permettant la superposition de points correspondants de l'hémirétine nasal d'un œil et temporal de l'autre, ainsi que l'intégrité du cortex visuel.

Il ne doit pas exister de limitation de la motilité de chaque œil et l'équilibre oculomoteur doit être normal afin que les objets perçus au niveau de l'horoptère (cf. Figure 12) puissent se projeter sur des points réiniens correspondants. Ces derniers peuvent être définis comme deux points possédant une même direction en vision monoculaire ou binoculaire. Ils sont situés à une même distance de la fovéa de chaque œil.

Enfin, l'existence d'un écart interpupillaire est à l'origine d'une disparité binoculaire de fixation. La disparité horizontale constitue le facteur essentiel de la vision stéréoscopique.

En fonction du temps de présentation des stimuli, du degré de disparité binoculaire requis pour déclencher une sensation de relief ou du champ de vision à analyser, il est possible de différencier plusieurs formes de vision stéréoscopique. Cette vision du relief s'applique également à des objets en mouvement.

La vision binoculaire nécessite que chaque œil ait une acuité visuelle « satisfaisante » témoignant d'une normalité oculaire, des voies visuelles ainsi que des structures visuelles corticales. Elle impose également un bon équilibre oculomoteur permettant un alignement des objets perçus sur des points réiniens correspondants. En effet, la vision binoculaire repose sur la mise en jeu de ces points réiniens correspondants, puisque le premier temps consiste en la stimulation de ceux-ci au niveau de la rétine de chacun des deux yeux. Leur message est transmis de façon monoculaire jusqu'au cortex cérébral, au niveau duquel est réalisée l'intégration binoculaire.

3.2.3.2 Intérêt et pré-requis de la vision binoculaire

Intérêt de la vision binoculaire :

L'acuité visuelle binoculaire est meilleure que l'acuité visuelle monoculaire, grâce à la superposition de l'hémirétine nasale d'un œil sur l'hémirétine temporale de l'œil controlatéral [Harwerth et Smith, 1985]. De plus, une vision binoculaire, même rudimentaire, permet la présence d'un champ visuel étendu, supérieur au champ visuel de chaque œil [Risse, 1999]. Ce dernier comporte une zone de superposition ou de chevauchement du champ visuel de chaque œil de l'ordre de 120°.

Pré requis pour l'existence d'une vision binoculaire :

Ils sont au nombre de quatre, mais ils peuvent être séparés en 2 groupes : d'une part les facteurs anatomiques et d'autre part les facteurs moteurs. Il est évident qu'il est indispensable d'avoir 2 yeux fonctionnels et ayant une vision « utile ». La valeur de cette vision « utile » reste difficile à préciser, de même que la valeur de l'acuité visuelle en dessous de laquelle la vision binoculaire et la vision stéréoscopique seraient perturbées. Par contre, il faut, autant que faire se peut, obtenir une isoacuité. Outre la normalité des milieux oculaires, il faut donc qu'il n'y ait pas d'anisométrie importante ou qu'elle soit corrigée en lentilles pour éviter l'aniséiconie. Le deuxième facteur anatomique implique la présence d'une héli-décussation des voies optiques au niveau du chiasma, permettant la superposition de points correspondants au niveau des hémirétines nasale d'un œil et temporale de l'autre. Enfin, il faut une intégrité du cortex visuel permettant l'intégration binoculaire sans phénomène de neutralisation. Les facteurs moteurs assurent le bon alignement des globes, qui doivent bénéficier d'une complète liberté de mouvement, sans phénomènes de rétraction musculaire ni de synéchies conjonctivales. De plus, la position des globes doit pouvoir être maintenue dans toutes les positions sans décalage, impliquant un tonus musculaire normal.

Lorsqu'un œil perçoit un objet ponctuel, ce dernier se projette sur un « point réinien », terme utilisé par simplification pour évoquer le photorécepteur stimulé et, au delà, les neurones de la voie rétino-géniculo-striée par lesquels l'information chemine vers le cortex. Chaque point réinien a une direction visuelle qui lui est propre (droite passant par ce point réinien et le centre du cristallin) et qui correspond à la direction de l'objet perçu.

En vision binoculaire, la transmission du message visuel à partir d'un photorécepteur (ou point réinien) garde son caractère monoculaire jusqu'au cortex strié. C'est à ce niveau que le message

visuel de chaque œil est associé à celui de l'œil controlatéral et que s'effectue l'analyse « binoculaire ».

3.2.3.3 Vision binoculaire

Le texte et les images de cette section sont issus d'une publication de Christophe Orssaud [Orssaud, 2006].

Système binoculaire :

- Points réiniens correspondants : lorsqu'un objet ponctuel se projette sur deux points réiniens situés à une égale distance de la fovéa sur chaque œil, ceux-ci sont appelés « points réiniens correspondants ». Les deux fovéas représentent les « points réiniens correspondants » par excellence. En l'absence de trouble oculomoteur ou de la statique oculaire (hétérophorie), deux « points réiniens correspondants » peuvent également être définis comme deux points associés à une même direction en vision monoculaire ou binoculaire [Tychsen, 1992]. Les coordonnées de ces points réiniens correspondants sont stables quelles que soient les circonstances, en particulier lors des mouvements de vergence associés à une modification des lignes de direction principale de chaque œil [Hillis, 2001].
- Vision simultanée : la perception comme une image unique de deux images strictement différentes perçues chacune par un œil, définit la vision simultanée. Celle-ci constitue le premier degré de la vision binoculaire dans la classification de Worth.

La fusion :

Second degré de la vision binoculaire dans la classification de Worth, elle se définit par la perception comme image unique de deux images qui ne diffèrent l'une de l'autre que par quelques détails. Elle nécessite donc un bon équilibre oculomoteur, puisqu'elle comporte, outre un versant sensoriel, un versant moteur.

L'horoptère

L'horoptère est défini d'un point de vue géométrique comme l'ensemble des points de l'espace dont les images se forment sur les points correspondants des deux yeux dans l'exercice normal de la vision binoculaire [Tychsen, 1992], [Shipley, 1970]. Le centre de ce plan qui constitue l'horoptère correspond au point de fixation (*cf.* Figure 12).

Plus le point de fixation est éloigné, plus l'horoptère géométrique est grand.

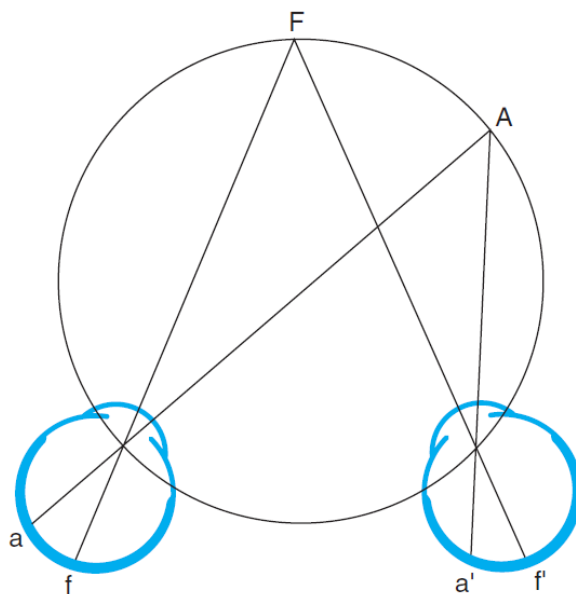


Figure 12 : horoptère géométrique

La diplopie et la confusion

Lorsqu'il existe une perte d'alignement ou une déviation oculaire, quelle qu'en soit la cause, la ligne de direction principale de chaque œil ne correspond plus à celle de l'œil controlatéral. La diplopie est définie par la perception dédoublée d'un objet isolé, la confusion correspond à une mauvaise localisation dans l'espace d'un objet. La Figure 13 précise ces notions :

- diplopie : l'image du point A se forme sur la fovéa de l'œil gauche (en f) et sur un point non concordant de l'œil droit (point a') ;
- confusion : les fovéas de l'œil gauche (f) et de l'œil droit (f') ne perçoivent pas le même objet.

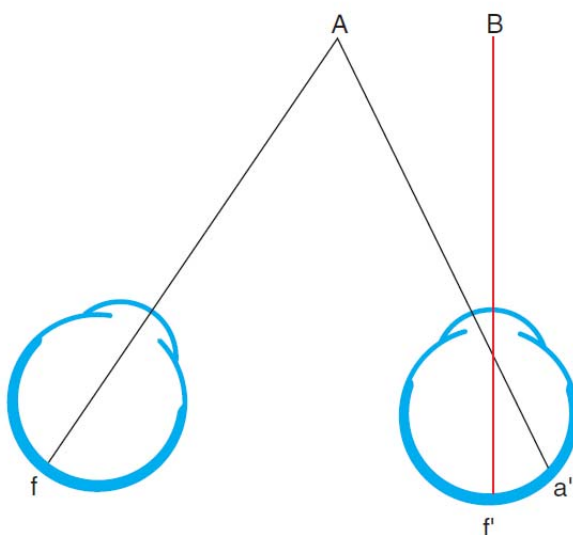


Figure 13 : diplopie et confusion

L'aire de Panum

L'aire spatiale de Panum est définie comme la zone de l'espace visuel située de part et d'autre de l'horoptère et au niveau de laquelle les points sont vus simples. Tous les objets situés dans l'aire de Panum sont vus sans diplopie [Tychsen, 1992].

- Aire spatiale de Panum : l'aire spatiale de Panum est limitée par les deux plans, situés en avant et en arrière de l'horoptère, à l'intérieur desquels tous les points se projettent sur un point rétinien d'un œil et au niveau de l'aire fusionnelle de l'œil controlatéral en passant par le point nodal des yeux. Cette aire de Panum a la forme d'une lentille biconcave.

- Aire fusionnelle de Panum : à l'aire spatiale de Panum est associée une aire fusionnelle rétinienne de Panum. Celle-ci représente le territoire rétinien qui permet de conserver une vision unique d'un objet alors que celui-ci se projette sur un point rétinien non strictement correspondant au point de projection sur la rétine controlatérale.

La Figure 14 présente les deux situations : l'aire de Panum est comprise entre les deux demi-cercles. L'aire fusionnelle de Panum correspond à la surface représentée à l'œil droit. Le point A se projette en f au niveau de l'œil gauche et dans l'aire fusionnelle de l'œil droit et non strictement en f .

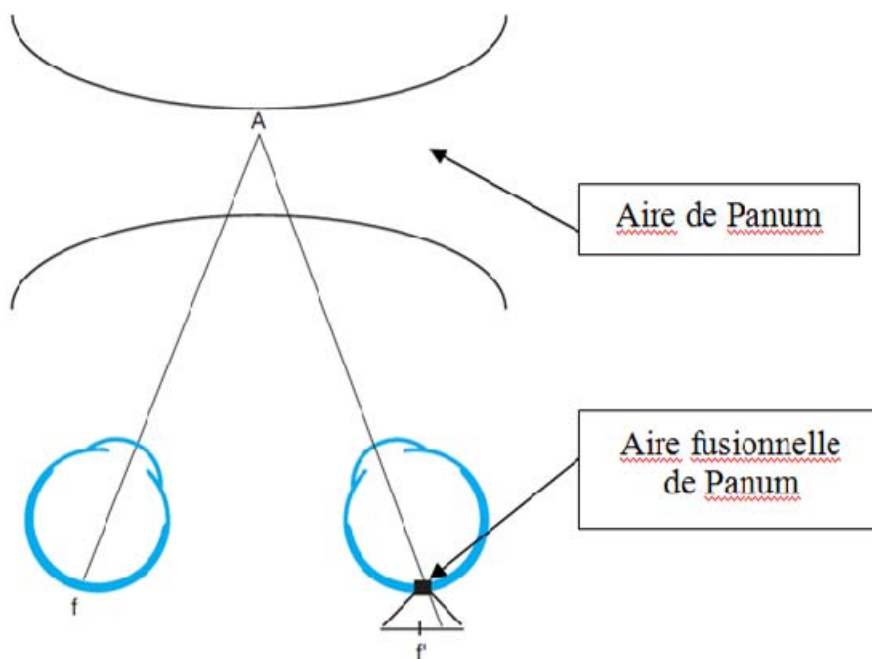


Figure 14 : aire de Panum et aire fusionnelle de Panum

Les objets situés dans l'aire spatiale de Panum, mais en arrière de l'horoptère, se projettent dans le secteur nasal de l'aire fusionnelle. Les objets situés en avant de l'horoptère, mais qui restent dans l'aire spatiale de Panum, se projettent dans le secteur temporal de l'aire fusionnelle.

Disparité binoculaire ou parallaxe binoculaire

Les deux yeux présentent un écart horizontal au niveau du crâne. Celui-ci est variable selon les sujets, de l'ordre de 6,5 centimètres en moyenne, avec une distance intercanthale interne de l'ordre de 3,2 centimètres. Chaque œil voit donc un même objet selon un angle légèrement différent ou selon une perspective légèrement différente. Cette différence de perception crée des disparités binoculaires. Le seuil de perception de la disparité binoculaire augmente avec l'excentricité des objets et leur éloignement de l'horoptère [Prince et Rogers, 1998]. Cette disparité binoculaire peut être expliquée par l'existence d'une asymétrie de l'angle formé pour chaque œil

entre la ligne de direction principale et la ligne de direction secondaire dirigée vers un objet situé en dehors de l'horoptère. Elle est associée à la projection d'un objet simple, situé en dehors de l'horoptère, sur des points rétiens non strictement correspondants. *A contrario*, l'horoptère peut donc être défini comme étant le plan associé à une disparité binoculaire nulle, puisque tous les points de ce plan se projettent sur des points rétiens strictement correspondants.

L'aire de Panum correspond à la zone de l'espace dans laquelle l'existence d'une disparité binoculaire n'entraîne pas de vision double. Bien que la disparité binoculaire soit associée à la projection d'un objet sur des points rétiens non strictement correspondants, aucune diplopie n'est ressentie dès lors qu'à un point rétien d'un œil est associée une aire fusionnelle de Panum au niveau de l'œil controlatéral.

La disparité binoculaire est croisée lorsque l'objet regardé est situé entre le patient et l'horoptère. Cette disparité croisée donne une sensation de proximité de l'objet ou une diplopie croisée. Elle favorise les mouvements de vergence. La disparité binoculaire est dite directe lorsque l'objet perçu est situé au delà de l'horoptère. Cette disparité est associée à une sensation d'augmentation de la distance de l'objet.

Disparité horizontale et verticale

La disparité horizontale correspond à la composante horizontale de la disparité binoculaire. Elle est déterminée à partir de l'horoptère longitudinal. De la même manière, il existe aussi une disparité verticale, de moindre étendue que la disparité horizontale. Cette disparité verticale est compatible avec une fusion quand la différence de perception dans le sens vertical n'est pas trop importante.

La disparité horizontale constitue le *stimulus* essentiel de la vision stéréoscopique, et, de ce fait, pour la sensation de profondeur et le déclenchement de certains mouvements de vergence. Mais le rôle de la disparité verticale dans la vision stéréoscopique reste controversé. Il est avancé que la disparité verticale n'induit pas de réelle vision stéréoscopique, mais qu'elle est nécessaire pour l'étalonnage de la disparité horizontale [Garding *et al.*, 1995], [Gillam et Lawergren, 1983], [Liu *et al.*, 1994]. Néanmoins, sa participation à la formation d'une vision en relief et en profondeur est admise par certains auteurs, même si les mécanismes expliquant ce phénomène restent peu clairs [Westheimer et Pettet, 1992], [Durand *et al.*, 2002], [Matthews *et al.*, 2003].

Disparité de fixation

L'aire de Panum permet d'expliquer également la notion de disparité fusionnelle ou de disparité de fixation. L'existence d'une anomalie minimale de l'alignement oculaire lors de la fixation n'est pas associée à une diplopie, à condition que l'angle de déviation reste dans les limites de l'aire de Panum [Reading, 1980]. L'importance physiologique de cette disparité de fixation n'est pas clairement déterminée. Il est classiquement admis que celle-ci traduit une anomalie de l'équilibre des vergences. Par contre, certains auteurs estiment qu'elle pourrait constituer un *stimulus* permettant de maintenir un alignement oculaire correct lors de la fixation. Ceci pourrait expliquer des différences de sensibilité à l'information de profondeur issue de la parallaxe.

En son centre, l'aire de Panum présente une étendue de 12 à 20 minutes d'arc. Cette étendue augmente d'une à deux minutes d'arc par degré d'excentricité du regard. En périphérie, l'étendue de l'aire de Panum est donc nettement plus importante. Cette augmentation de surface de l'aire de Panum permet de comprendre que la diplopie est minimale ou absente pour les objets perçus dans la périphérie du champ visuel alors qu'ils se projettent sur des points non correspondants du fait de la disparité horizontale.

Outre son excentration, la taille de l'aire de Panum varie également avec les caractéristiques du *stimulus* visuel : fréquence spatiale, netteté, vitesse de déplacement. Ainsi, l'étendue de cette aire est moins importante dès lors que le *stimulus* est plus net (haute fréquence spatiale) et se déplace rapidement.

3.2.3.4 Vision du relief et stéréoscopie

La vision stéréoscopique se réfère strictement à la capacité dont dispose le système visuel pour percevoir le relief et la profondeur à l'aide de la vision binoculaire. Dans la classification de Worth, cette vision stéréoscopique est considérée comme étant le 3^{ème} degré de la vision binoculaire.

D'après les rapports de l'Inserm et de l'Anaes ([Inserm, 2002], [Anaes, 2002]) s'intéressant à la population française, 20 % des enfants de moins de 6 ans présentent une anomalie visuelle. Parmi ces anomalies, la plus fréquente est l'amblyopie unilatérale. En effet, selon les études, 3 à 8 % de la population générale présente une amblyopie définitive qui correspond à un déficit visuel fonctionnel.

Une revue récente indique une prévalence de 5 à 33 % [Cooper et Jamal, 2012] pour les anomalies de la vergence. Il n'existe pas de données épidémiologiques similaires concernant la vision stéréoscopique.

Bases de la vision stéréoscopique

La vision stéréoscopique permet de construire une notion de la profondeur et / ou du relief, du fait de la disparité horizontale, avec la participation de la disparité verticale, dont le rôle controversé a été évoqué ci-dessus.

La disparité horizontale rend compte de ce que les différents points qui composent un objet ne stimulent pas des points réiniens correspondants. Or, il est indispensable que des points réiniens non correspondants soient stimulés pour que le système nerveux central puisse reconstituer la vision stéréoscopique. Il est également indispensable que le système nerveux central ait à analyser et comparer la localisation d'au moins deux objets situés dans des plans différents de l'aire de Panum pour que la perception de la profondeur, basée sur la vision stéréoscopique, puisse être ressentie. Enfin, la sensation de vision binoculaire et de vision stéréoscopique ne nécessite pas que chaque œil voit un même objet. Une sensation de profondeur est perçue y compris lorsque chaque œil voit des fragments différents d'un objet et que ces différents fragments sont en continuité l'un avec l'autre [Forte *et al.*, 2002]. Ce phénomène confirme l'importance de l'intégration cérébrale de l'information visuelle dans la vision stéréoscopique.

Valeurs et tests de la vision stéréoscopique

La stéréoaucuité détermine la plus petite unité de vision stéréoscopique qu'un œil est capable de détecter, c'est à dire la sensibilité à la disparité du système optique binoculaire ou encore la plus petite disparité binoculaire perçue par ce système pour une personne donnée. Cette valeur s'exprime généralement en secondes d'arc. Un adulte sans antécédent ophtalmologique ou orthoptique particulier doit être capable de distinguer le relief pour des valeurs de disparité binoculaire inférieures à 30". Plusieurs facteurs sont susceptibles de modifier ces valeurs.

Paramètres modifiant la vision stéréoscopique

À distance constante, la valeur de l'acuité stéréoscopique est d'autant plus élevée que la disparité binoculaire tend vers un certain seuil. Enfin, les capacités de détection de la vision stéréoscopique diminuent au fur et à mesure que les objets s'éloignent. Pour des objets situés au-delà de 600 mètres environ, il n'existe plus de stéréoscopie vraie.

D'autres paramètres vont modifier les capacités de discrimination de la disparité binoculaire. Il s'agit d'une part des anomalies réfractives bilatérales et surtout unilatérales. Ces dernières entraînent une diminution plus importante de la vision stéréoscopique que ne le font les anomalies réfractives bilatérales non corrigées. D'autre part, les asymétries de la réfraction ont déjà été évoquées. Lorsqu'elles sont corrigées à l'aide de lunettes, ces asymétries peuvent induire des images réiniennes de tailles différentes. Celles-ci vont créer une sensation de déviation du « plan fronto-parallèle apparent » autour du point de fixation et perturber la fusion et la sensation de relief. Néanmoins, la tolérance à l'anisétropie est extrêmement variable d'une personne à l'autre. Enfin,

les capacités de discrimination de la disparité binoculaire dépendent de la taille et du contraste du *stimulus* mais aussi de sa couleur [Krauskopf et Forte, 2002],[Kingdom, 2003].

Tests

Les tests de vision stéréoscopique n'évaluent pas réellement la perception du relief. Ils font appel à des stéréogrammes dont il existe deux types : les stéréogrammes « à contours définis » et les stéréogrammes « à disparité définie ». Ces différents tests n'étudient pas les mêmes paramètres.

Les stéréogrammes « à contours définis » mesurent la stéréoscopie dite locale grâce à des figures à contraste élevé et disparité rétinienne franche. Mais ces tests présentent des caractéristiques qui rendent également possible la détection du relief à partir de données non stéréoscopiques. À l'inverse, les stéréogrammes « à disparité définie », mesurant la stéréoscopie globale, tels que les tests à points déterminés au hasard, ne peuvent pas être analysés en se basant sur des paramètres non binoculaires. Ces tests permettent de déterminer des seuils de vision stéréoscopiques relativement plus bas qu'avec les tests à contours définis. Ces derniers peuvent être utiles pour différencier les patients normaux de ceux ayant une mauvaise vision binoculaire [Patel *et al.*, 2003].

Enfin, plus le *stimulus* reste longtemps stationnaire sur la fovéa, pour un temps compris entre 500 millisecondes et 2 secondes, plus la sensibilité à la vision stéréoscopique est fine.

Les bases cérébrales du système visuel et de la vision binoculaire sont données en Annexe 3.

Fusion et rivalité binoculaires

La séparation entre l'information rétinienne occultée, non occultée et celle concernée par la rivalité binoculaire commence au niveau du corps genouillé latéral (CGL). Les deux images rétiniennes captées par les deux yeux sont véhiculées par le nerf optique pour être réparties dans les six couches du CGL. Les couches 2, 3 et 5 reçoivent les projections provenant de l'œil situé du même côté tandis que les couches 1, 4 et 6 reçoivent les projections de l'autre œil. L'intérêt principal d'une telle organisation est la classification de l'information rétinienne selon sa position spatiale. Ainsi, les projections d'un point de l'espace vont se retrouver côte à côte dans le corps genouillé latéral gauche ou droit, avant d'être fusionnées au niveau du cortex visuel.

La rivalité binoculaire survient quand les images rétiniennes présentent une différence importante. Etant donné que le système visuel humain ne peut pas fusionner deux informations différentes, l'image perçue est une image double contenant des informations des deux images stéréoscopiques superposées. Son corollaire est généralement une extinction d'une des deux images ou de portions d'images incohérentes. Ceci peut être illustré par une expérience appelée « le trou dans la main ». Pour réaliser cette expérience, il suffit de tenir un cylindre de carton par lequel un objet est regardé en utilisant l'œil gauche, alors que l'œil droit regarde la main droite juxtaposée au cylindre. L'image perçue par le système visuel humain (SVH) ne contient pas toute l'information acheminée dans les deux images rétiniennes. Ceci est dû à la suppression par le SVH de l'information la moins contrastée.

En situation naturelle, la rivalité binoculaire peut apparaître en cas de diplopie (vision double). Celle-ci est généralement due à des difficultés à conserver l'alignement des deux yeux.

En situation d'interfaçage 3Ds, nous pouvons distinguer deux cas dans lesquels la rivalité binoculaire peut se présenter. Le premier cas se présente quand la disparité entre les deux images est très importante. Le deuxième cas se présente lorsque les deux images stéréoscopiques contiennent des objets différents à appairer. Cette différence est due au bruit, à des problèmes de transmission ou encore à des problèmes d'éclairage pendant l'acquisition.

Dans toutes les régions cérébrales visuelles au-delà de V1, on retrouve un codage de la disparité horizontale. C'est cependant dans V1 que le codage de la disparité est le plus précis. Par ailleurs, il existe des interactions entre les informations visuelles de disparité et des informations non

visuelles. Chez le primate non humain, les signaux extra-rétiniens de vergence ou de direction du regard influent directement sur la réponse des neurones de V1 sélectifs à la disparité. On retrouve ainsi un codage de la direction du regard dans toute la voie visuelle ventrale, et dans l'hippocampe. Trotter et Durand ([Trotter *et al.*, 2004][Durand *et al.*, 2004]) ont également montré un codage de la disparité verticale dans V1.

3.2.3.5 Mécanismes moteurs soutenant la vision binoculaire

Pour explorer le monde visuel tridimensionnel, apprécier avec précision l'emplacement des obstacles lors de notre navigation dans l'espace, réaliser des activités de lecture ou de travail sur écran, un bon fonctionnement des mouvements de nos deux yeux est indispensable. Plusieurs mouvements oculaires permettent de réaliser ces opérations : les mouvements latéraux, verticaux ou obliques pour modifier la direction du regard et les mouvements de vergence pour modifier la profondeur de la vision. Les mouvements directionnels (latéraux ou verticaux) sont réalisés par des saccades oculaires qui sont les mouvements les plus rapides dont le corps humain soit capable, mais aussi les plus robustes et résistants à l'âge et à la fatigue. Pour régler l'angle des axes optiques selon la profondeur à laquelle se situe l'objet que nous souhaitons regarder, nos yeux effectuent des mouvements dits de vergence (en direction opposée pour les deux yeux) ; les yeux convergent pour fixer un objet proche et ils divergent pour fixer un objet lointain. Lorsque les objets sont placés le long du plan médian, l'exécution de ces mouvements de vergence est relativement lente. Le plus souvent, les objets sont placés à des directions et distances différentes et la fixation d'un objet à l'autre requiert des mouvements combinant à la fois saccades et vergence. Ces mouvements ont des propriétés spatiotemporelles spécifiques ; ils peuvent être rapides, presque comme les saccades, mais ils sont d'une ampleur différente entre les deux yeux. Ainsi, le véritable moteur de l'exploration de l'environnement visuel 3D et de vision binoculaire est le mouvement combiné, autrement dit, la synergie entre saccade et vergence.

Un bon fonctionnement de ces mouvements est sous-tendu par l'activation d'un réseau cérébral étendu (cortex visuel, aires pariétales frontales), des aires sous corticales, du tronc cérébral où les commandes motrices sont générées et du cervelet [Leigh *et al.*, 2006]. Or, les mouvements de vergence sont particulièrement fragiles, affectés par la fatigue, l'âge, les médicaments et toute atteinte neurologique, même modérée [Ciuffreda *et al.*, 2007], [Ciuffreda *et al.*, 2008], [Leigh *et al.*, 2006]. Leur dysfonctionnement peut être à la source d'une fatigue visuelle, de céphalées ou encore de troubles d'équilibre, voire de chutes [Matheron et Kapoula, 2008], [Matheron *et al.*, 2011], [Matheron *et al.*, 2008].

Les caractéristiques de base des mouvements des saccades et de la vergence sont décrites plus en détail ci-après.

Caractéristiques des saccades

Les saccades sont les mouvements très rapides qui permettent de changer la direction du regard. En d'autres mots, la profondeur du regard n'est pas modifiée, les positions de départ et d'arrivée des yeux se situent sur un plan d'isovergence (même angle de vergence requis), en première approximation, un plan fronto-parallèle. Le signal déclenchant la saccade oculaire peut être une erreur rétinienne de position identique pour les deux yeux, à savoir l'excentricité de la cible par rapport à la fovéa. Les saccades peuvent toutefois être déclenchées en l'absence de tout *stimulus* visuel. La Figure 15 ([Mays *et al.*, 1986]) présente la position des yeux au cours du temps pendant une saccade vers la gauche. La ligne *VL* est la position verticale de l'œil gauche (un signal vers le haut/bas correspond à un mouvement vers le haut/bas). Les lignes *HL* et *HR* représentent les positions horizontales de l'œil gauche et de l'œil droit (un signal vers le haut/bas correspond à un mouvement vers la droite/gauche). Enfin, la ligne *VA* est l'angle de vergence (un signal vers le haut/bas correspond à une convergence/divergence).

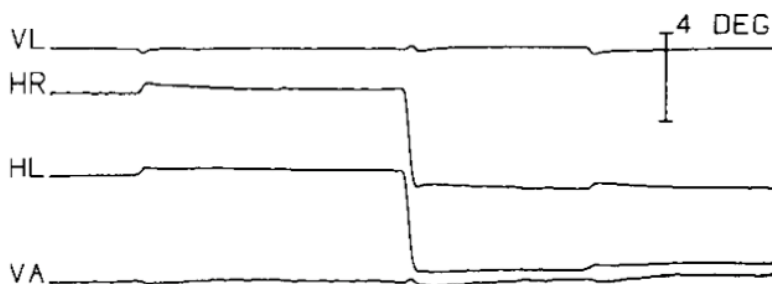


Figure 15 : position des yeux au cours du temps pendant une saccade vers la gauche (source : Mays *et al.*, 1986).

On peut recenser différentes classes de saccades : les saccades volontaires, par exemple pendant la recherche d'objets dans le monde visuel, les saccades réflexes qui surviennent quand le regard est attiré par l'apparition soudaine d'un *stimulus* (visuel, sonore ou tactile) dans l'environnement, les saccades spontanées, les phases rapides des réflexes optocinétique et vestibulo-oculaire et enfin les saccades pendant les phases de sommeil paradoxal (REM, *rapid-eye-movement sleep*). Bien que d'origines très différentes, ces saccades ont en commun plusieurs caractéristiques que nous allons brièvement décrire.

Nature balistique de la saccade et vision pendant la saccade

Les saccades sont des mouvements très rapides (leur vitesse peut atteindre $500^\circ/\text{s}$), qui durent généralement moins de 100 ms. Les informations visuelles n'ont donc pas le temps d'influencer le mouvement une fois démarré : on a d'abord pensé qu'elles fonctionnaient principalement en boucle ouverte. Les saccades ne sont pourtant pas totalement balistiques. Robinson [Robinson, 1975] est le premier à supposer que les saccades seraient sous le contrôle d'une boucle de rétroaction rapide, principalement basée sur une copie efférente des signaux moteurs.

D'autre part, nous expérimentons un monde stable même quand nous bougeons nos yeux à plusieurs centaines de degrés par seconde. Plusieurs phénomènes pourraient contribuer à cette stabilité perceptive. Premièrement, des images glissant rapidement sur la rétine pourraient être floues et non perceptibles. Ensuite, une suppression saccadique permettrait de couper les entrées visuelles pendant les déplacements rapides du regard [Zuber et Stark, 1966]. Cette suppression se ferait par un masquage proactif et rétroactif des images visuelles avant et après la saccade. Ce masquage peut-être levé en manipulant les *stimuli* visuels, par exemple en présentant une scène visuelle uniquement pendant la saccade [Campbell et Wurtz, 1978], ou en déplaçant un élément du monde visuel pendant la saccade [Brooks *et al.* 1980], ou encore en présentant un déplacement très rapide non perceptible pour l'œil stable mais détectable au moment du pic de vitesse de la saccade [Castet et Masson, 2000].

Morphologie des saccades

Une caractéristique très solide des saccades est la relation entre leur taille, leur vitesse et leur durée. Plus la saccade est grande, plus elle est rapide et plus elle dure longtemps. Cette relation est souvent décrite sous le terme de séquence principale de la saccade (*main sequence*, [Boghen *et al.*, 1974], [Bahill *et al.*, 1975]). Certains facteurs, non contrôlables par la personne réalisant les saccades, peuvent tout de même influencer cette séquence principale : variabilité journalière, fréquence de présentation des *stimuli* visuels, direction du mouvement, *etc.* La Figure 16 représente les séquences principales des saccades ([Leigh et Zee, 2006]) : le pic de vitesse en fonction de l'amplitude des saccades (A) et la durée de la saccade en fonction de l'amplitude (B). Les points sont des données issues de 10 sujets sains et les croix des données issues de patients avec une maladie Niemann-Pick de type C.

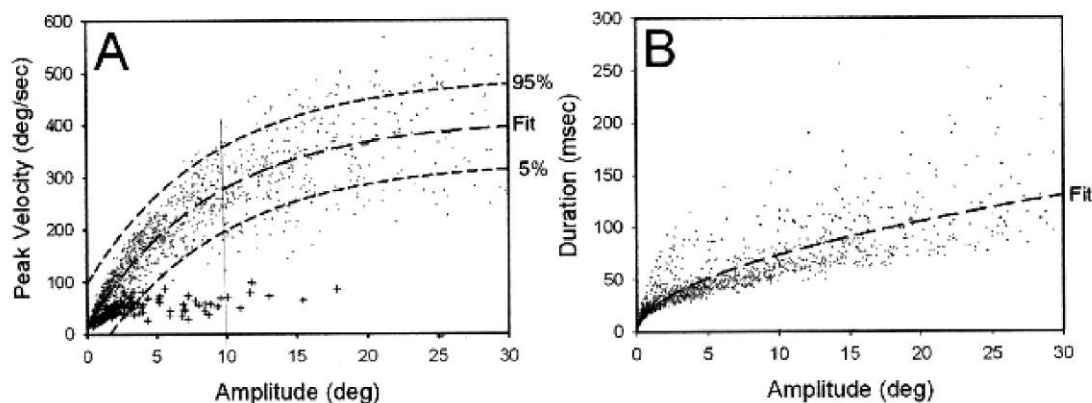


Figure 16 : séquences principales des saccades (source : Leigh et Zee, 2006)

La forme des saccades est également bien particulière. Pendant une saccade, les yeux accélèrent, jusqu'à atteindre un pic de vitesse maximal, puis décélèrent. La phase d'accélération est en générale plus courte que la phase de décélération : le pic de vitesse maximal arrive au début du mouvement. Le rapport de la durée de la phase d'accélération sur la durée totale de la saccade est appelé *skewness* et varie en fonction de la durée des saccades [van Opstal et van Gisbergen, 1987].

Pendant une saccade, le mouvement des deux yeux n'est pas parfaitement le même. En général, l'œil abducteur (qui se tourne vers l'extérieur) va plus vite et plus loin que l'œil adducteur (qui se tourne vers l'intérieur), et son pic de vitesse arrive plus tôt. Les yeux divergent en début de saccade pour converger en fin de saccade. Néanmoins, la vergence ne compense pas parfaitement la divergence initiale. La saccade se termine donc avec une erreur de l'angle de vergence. Pour compenser, un glissement convergent disconjugué, c'est-à-dire différent pour les deux yeux, peut avoir lieu pendant la fixation [Collewijn *et al.*, 1988a, 1998b].

Une saccade peut dépasser sa cible, être hypermétrique (*overshoot*), ce qui est généralement observé pour les petites saccades ; elle peut avoir au contraire manqué sa cible, être hypométrique (*undershoot*), ce qui est généralement observé pour les grandes saccades. Ce phénomène est particulièrement observé quand les cibles apparaissent à différentes positions (*range effect*, [Kapoula, 1985]). Une saccade corrective, démarrant environ 100-150 ms après la première saccade, peut ensuite amener rapidement les yeux plus près de la cible visuelle [Becker et Fuchs, 1969]. Les saccades correctives sont basées sur les signaux d'erreurs rétiniennes à la fin de la première saccade, mais des signaux extrarétiniens peuvent également renseigner sur la précision de la saccade primaire [Ohtsuka *et al.*, 1989]. Après la saccade, des mouvements de glissement des yeux peuvent être observés pendant la fixation. Nous avons déjà parlé du glissement de fixation disconjugué, susceptible de réduire la disparité induite par l'asymétrie des saccades. On observe également un glissement de fixation conjugué, identique pour les deux yeux, qui serait lié à un mauvais appariement des commandes phasiques et toniques envoyées aux muscles extra-oculaires lors de la saccade ; cette double innervation est censée correspondre aux propriétés visco-élastiques de l'appareil oculomoteur périphérique. De tels glissements des yeux peuvent compromettre la stabilité de la fixation et la qualité de l'analyse visuelle.

Les saccades permettent de modifier la direction du regard, elles peuvent donc être horizontales, verticales, ou obliques. Cette distinction n'est pas arbitraire car les générateurs de saccades horizontales et verticales sont distincts au niveau du tronc cérébral. Pour les saccades obliques, les composantes horizontales et verticales sont généralement démarrées en même temps. Si elles sont d'amplitude égale, la trajectoire est rectiligne, mais en cas d'asymétrie des déplacements horizontaux et verticaux, les trajectoires peuvent être incurvées [Bahill et Stark, 1975], [Becker et Jürgens, 1990].

Caractéristiques des vergences

La fonction de la vergence est d'orienter les axes optiques des deux yeux de telle sorte qu'ils se croisent à la profondeur à laquelle se trouve l'objet d'intérêt. En effet, pour qu'un petit objet soit vu avec une bonne résolution et de façon unie, il doit être projeté sur les deux fovéas, points réiniens correspondants majeurs. D'autres points du monde visuel sont également perçus de manière unie, car ils stimulent d'autres points réiniens correspondants. Pour une fixation donnée, l'ensemble des points du monde visuel stimulant des points réiniens correspondants est situé sur le cercle de Vieth-Müller. D'un point de vue psychophysique, la courbe, légèrement différente, s'appelle l'horoptère. Une petite déviation de part et d'autre de ce plan peut également provoquer la fusion des deux images réiniennes : cette zone est désignée aire de fusion de Panum.

Un objet situé au-delà de l'aire de fusion de Panum est donc à une profondeur différente de la profondeur à laquelle le regard est fixé : les points réiniens pour cet objet ne sont pas correspondants et la disparité qui en résulte provoque une vision double. On peut réaliser l'expérience de placer un stylo devant soi : si on fixe le stylo, un objet loin derrière apparaîtra double. Si on fixe au contraire l'objet loin derrière, c'est le stylo qui apparaîtra double. Cette diplopie naturelle n'est généralement pas gênante dans la vie quotidienne. Au contraire, les disparités stimulées par des projections sur des points réiniens non correspondants constituent des indices très importants (parmi d'autres indices monoculaires) permettant une vision 3D et la perception de la profondeur.

Un autre indice de profondeur serait donné par l'angle de vergence (angle formé par les deux axes visuels), indicatif de la profondeur à laquelle le regard est fixé. Il y a en effet une vergence tonique, qui permet de garder le regard à une profondeur donnée [Owen et Leibowitz, 1983]. Deux sortes de mouvements permettent d'ajuster l'angle des axes optiques selon la profondeur : la divergence, quand le point de fixation s'éloigne et que l'angle de vergence diminue, et la convergence, quand le point de fixation se rapproche et que l'angle de vergence augmente. Nous allons à présent voir quelques caractéristiques de ces mouvements de vergence.

Les stimuli déclenchant la vergence

Deux grands types de *stimuli* déclenchent les mouvements de vergence. Il s'agit de la disparité, qui produit une diplopie et engendre des mouvements de fusion, et du flou réinien, qui engendre des mouvements de vergence couplés à l'accommodation. Un troisième *stimulus* peut également participer. Il s'agit de la sensation de proximité des cibles, qui peut survenir grâce à de nombreux indices de profondeur monoculaire, comme les indices de taille, d'interposition, de hauteur dans le champ visuel, de texture, de perspective, de parallaxe du mouvement, *etc.* [Leigh et Zee, 2006].

La vergence fait partie de la triade de proximité (*near triade*) : vergence, accommodation et taille de la pupille s'influencent mutuellement, même s'il existe une certaine indépendance entre ces trois composantes. Comme les saccades, la vergence peut être déclenchée volontairement, mais le plus souvent elle est faite de manière inconsciente.

Physiologie de la vergence

Les vergences sont des mouvements plus lents que les saccades : elles sont déclenchées plus tardivement et leurs vitesses sont moins grandes. Le mouvement en réponse au déplacement soudain d'une cible en profondeur suit une exponentielle négative avec une constante de temps de l'ordre de 150-200 ms, qui correspond à celle de l'appareil orbital en réponse à un échelon. La commande motrice de vergence est donc principalement une commande tonique (*step*) [Robinson, 1966], [Mays, 1984], quoique des commandes phasiques (*pulse*) et phasiques-toniques (*pulse-step*) aient également été identifiées [Mays *et al.*, 1986]. Comme pour les saccades, il existe une séquence principale liant la vitesse, l'amplitude et la durée des vergences. La Figure 17 présente la position des yeux au cours du temps pendant une vergence (à gauche) et pendant une divergence (à droite) ([Mays *et al.*, 1986]). La ligne VL représente la position verticale de l'œil

gauche (un signal vers le haut/bas correspond à un mouvement vers le haut/bas). Les lignes HL et HR sont les positions horizontales de l'œil gauche et de l'œil droit (un signal vers le haut/bas correspond à un mouvement vers la droite/gauche). La ligne VA est l'angle de vergence (un signal vers le haut/bas correspond à une vergence/divergence).

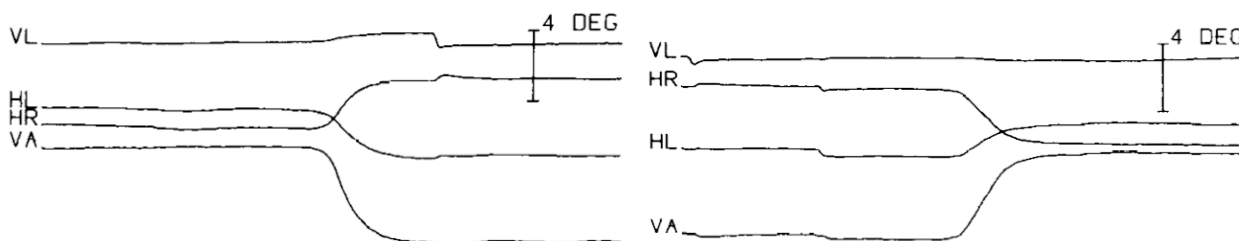


Figure 17 : position des yeux au cours du temps pendant une vergence (à gauche) et pendant une divergence (à droite) (source : Mays et al., 1986)

Dans les cas de grands mouvements de vergence, on peut distinguer deux composantes : l'initiation et la complétion [Westheimer et Mitchell, 1969], [Jones et Stephens, 1989]. L'initiation reflèterait un mécanisme de déclenchement, en boucle ouverte, et la complétion un mécanisme sous *feedback* visuel, stimulé par les erreurs de disparités résiduelles et destiné à rétablir la fusion (*fusion-lock*).

De la même façon que les saccades correctives, des vergences correctives peuvent exister. Enfin, les mouvements de vergence peuvent être stimulés par l'apparition brusque d'un objet en avant ou en arrière du point de fixation (ou par le déplacement volontaire du regard en profondeur), mais il existe également une vergence de poursuite en réponse au déplacement lent d'un objet en profondeur.

Synergie des saccades et de la vergence¹⁷

Dans la vie quotidienne, les mouvements de vergence pure sont rares. En général, les déplacements du regard changent à la fois la direction et la profondeur. Ces mouvements se réalisent par une synergie et une interaction complexe, non linéaire entre les systèmes physiologiques des saccades et des vergences : la vergence est accélérée par la saccade alors que la vergence décélèrera la saccade. Toutefois, l'accélération de la vergence par la saccade est plus importante que le ralentissement de la saccade. Le mouvement combiné ressemble à une saccade mais son amplitude est différente pour les deux yeux (ex : plus ample à l'œil droit quand on diverge à droite, ou à l'œil gauche quand on diverge vers la gauche, etc.). Avec de tels mouvements combinés et synergétiques, nous parvenons à orienter notre regard relativement rapidement d'un objet à l'autre quel que soit son emplacement en direction et en profondeur. L'ajustement prompt de la vergence pendant la saccade assure une fixation bifovéale et donc une bonne vision binoculaire unie de l'objet d'intérêt à chaque instant [Leigh et Zee, 2006].

Une des grandes questions théoriques et controversée actuelles est dans quelle mesure ces vergences combinées presque aussi rapides que les saccades sont véritablement des vergences ou bien des saccades codées de façon monoculaire et avec une amplitude différente pour chaque œil (hypothèse conforme à la pensée de Helmholtz, 1868).

Ceci remet en cause la validité d'une des lois fondamentales de l'oculomotricité, à savoir la loi de Hering (1868), dite loi de l'innervation égale des deux yeux. Toutefois, des preuves physiologiques existent en faveur de cette loi, même lorsque les mouvements combinés ont seulement

¹⁷ Pour plus d'information sur les saccades et les vergences, consulter la thèse de Marine Vernet hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/45/93/41/PDF/2009_VERNET.pdf

l'apparence d'être différents pour les deux yeux. Des études électrophysiologiques ont en effet montré que les cellules dans le tronc cérébral produisant la commande de vergence envoyée aux muscles extra-oculaires déchargent de façon plus vigoureuse lorsqu'une saccade est faite en même temps. Ces controverses importantes ont une pertinence par rapport à la rééducation de la motricité binoculaire : faudra-t-il rééduquer les vergences, les saccades ou les mouvements combinés ?

Populations avec troubles de vergence

Depuis 25 ans, le groupe IRIS (UMR 8194, CNRS Université René Descartes) étudie les bases neurales et la neurophysiopathologie des mouvements oculomoteurs au cours du développement, à l'âge adulte et au cours du vieillissement normal ou pathologique chez l'Homme. Les études conduites par ce groupe ont montré que certains aspects des mouvements des yeux, en particulier la coordination binoculaire et le contrôle de la vergence, se développent lentement avec l'âge grâce à des mécanismes d'apprentissage oculomoteur basés sur l'expérience visuelle. Ces aspects ne sont pleinement développés qu'à l'âge de 12 ans [Bucci *et al.*, 2006], [Bucci *et al.*, 2005], [Yang *et al.*, 2002], [Yang *et al.*, 2003]. Par ailleurs, les problèmes de coordination binoculaire et de vergence sont davantage marqués chez les enfants dyslexiques [Bucci *et al.*, 2008a], [Bucci *et al.*, 2008b], [Jainta *et al.*, 2011], [Kapoula *et al.*, 2007], [Kapoula *et al.*, 2007a], [Kapoula *et al.*, 2009], [Yang *et al.*, 2010a], les enfants strabiques [Bucci *et al.*, 2009a], [Bucci *et al.*, 1999a], [Bucci *et al.*, 1997], [Bucci *et al.*, 2006], [Bucci *et al.*, 2002], [Kapoula *et al.*, 1997], [Kapoula *et al.*, 2002] et les enfants ayant des vertiges¹⁸ sans pathologie vestibulaire [Bucci *et al.*, 2004], [Bucci *et al.*, 2009b], [Kapoula *et al.*, 2007b]. Les troubles oculomoteurs sont également présents chez les personnes adultes présentant des vertiges sans pathologie connue (souvent des personnes avec des activités professionnelles nécessitant un travail prolongé sur ordinateur) et chez les personnes souffrant de troubles auditifs tels que les acouphènes [Yang *et al.*, 2008a].

D'autres études à grande échelle, notamment aux États-Unis [Ciuffreda *et al.*, 2007], [Ciuffreda *et al.*, 2008], ont démontré qu'environ 20 % de la population était touchée par des problèmes de vergence.

Enfin, des études chez les personnes âgées suggèrent aussi la fragilité de ces mouvements. Chez la personne âgée, le vieillissement oculomoteur est spécifique car il touche uniquement certains aspects : il concerne en particulier le ralentissement du déclenchement des mouvements des yeux lorsqu'un contrôle volontaire est exigé, ainsi que le ralentissement de la trajectoire du mouvement de vergence, sur une composante oculomotrice témoignant d'une difficulté du traitement visuel de la disparité binoculaire [Kapoula *et al.*, 2008], [Yang *et al.*, 2006], [Yang *et al.*, 2008], [Yang *et al.*, 2006], [Yang *et al.*, 2008b], [Yang *et al.*, 2009a], [Yang *et al.*, 2009b].

Chez la personne âgée avec des antécédents de chutes, une difficulté particulière apparaît pour déclencher rapidement les mouvements oculaires [Yang *et al.*, 2008b], [Yang *et al.*, 2009b] ; le circuit neural, peut être sous-cortical, assurant des réponses oculaires automatiques, semble être affecté. Des études plus récentes mettent finalement en évidence des problèmes oculomoteurs chez des personnes souffrants de troubles auditifs [Kapoula *et al.*, 2010b], [Yang *et al.*, 2010b].

Pour conclure, nombreuses sont les populations présentant des troubles de la coordination binoculaire des mouvements et de la vergence, et ceci à tout âge. La vergence couplée de façon naturelle avec les saccades et l'accommodation est le pilier de la vision active, motrice du monde visuel tridimensionnel réel ou virtuel.

¹⁸ La définition clinique des vertiges est la suivante : symptôme subjectif à type d'illusion de mouvement en général rotatoire. Cette définition est issue du rapport de la Société Française d'ORL et de Chirurgie de la Face et du Cou « Vertiges positionnels » JP Sauvage, A Chays, A. Gentine 2007. Ed. l'Européenne Boulogne.

3.2.3.6 Schéma récapitulatif des indices permettant la perception de la profondeur de l'espace tridimensionnel.

Le schéma ci-dessous récapitule l'ensemble des indices permettant la perception de la profondeur de l'espace tridimensionnel.

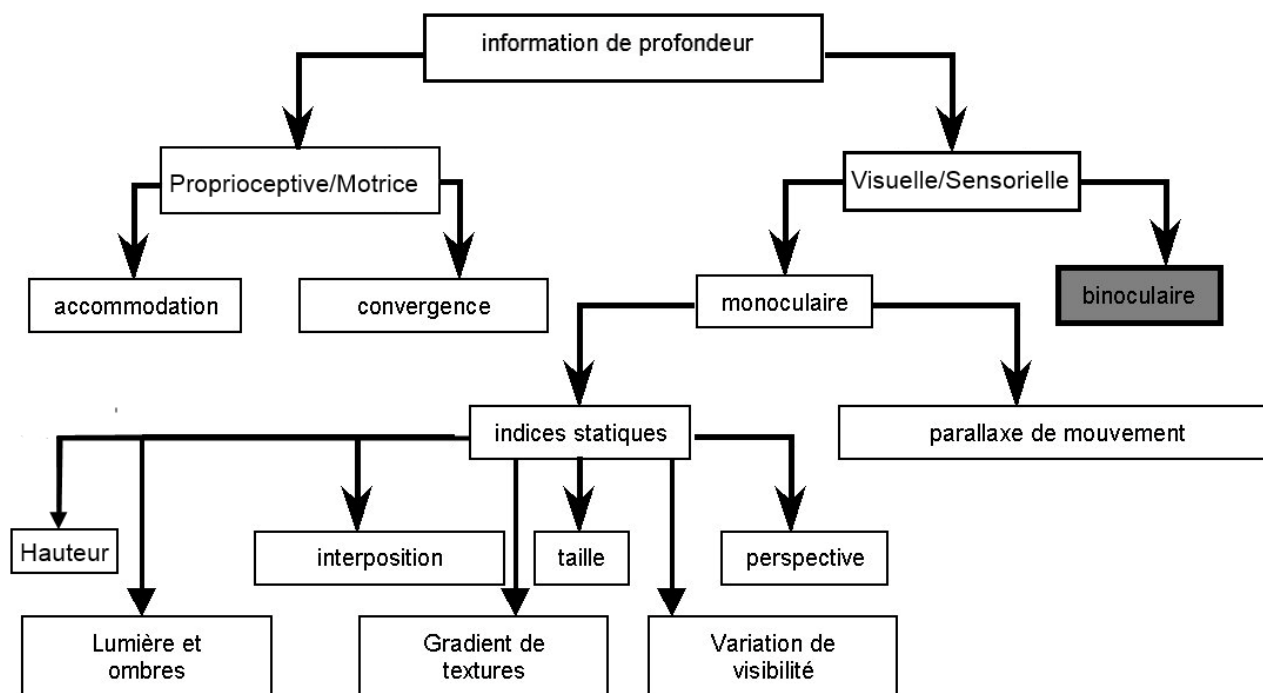


Figure 18 : indices permettant la perception de la profondeur de l'espace tridimensionnel

3.3 Développement visuomoteur chez l'enfant (développement visuel et perception spatiale)

Les capacités visuelles dépendent du développement normal neurologique et oculaire. Elles reposent sur l'acquisition des différents éléments que sont la vision centrale, la vision binoculaire et stéréoscopique, l'emmétropisation, la vision des couleurs, la vision des contrastes, la vision photopique et scotopique et l'oculomotricité (saccades, poursuite, vergences, fonction vestibulo-oculaire). À l'image de la croissance générale de l'enfant, ces acquisitions visuelles s'effectuent par étapes avec une progression non linéaire. Des facteurs extrinsèques peuvent participer au développement visuel, comme la nutrition et en particulier les acides gras à longue chaîne.

Le développement visuel est incomplet à la naissance. Il procède de deux composantes à la fois oculaire et neurologique. À la naissance, même pour les enfants nés à terme, la maturation visuelle est influencée par de nombreux facteurs dont la stimulation visuelle. Ce développement visuel est complexe et peut-être touché par plusieurs mécanismes physiopathologiques. Ces phénomènes regroupent les anomalies de réfraction, de maturation de la rétine, de transmission au niveau du nerf optique, de maturation du cortex visuel au niveau du lobe occipital et enfin du système cérébral d'intégration des données visuelles.

On rappelle ici que d'après les rapports de l'Inserm et de l'Anaes ([Inserm, 2002], [Anaes, 2002]) s'intéressant à la population française, 20 % des enfants de moins de 6 ans présentent une anomalie visuelle. Parmi ces anomalies, la plus fréquente est l'amblyopie unilatérale. En effet, selon les études, 3 à 8 % de la population générale présente une amblyopie définitive qui correspond à un déficit visuel fonctionnel.

Durant les premières années de vie, il existe des périodes critiques du développement visuel qui, si elles sont perturbées, peuvent résulter en un handicap visuel à long terme. Les nourrissons et les enfants sont donc particulièrement susceptibles de développer des anomalies visuelles, si les conditions optimales du développement visuel ne sont pas réunies.

3.3.1 Développement visuel normal

Lors du développement visuel normal, les processus incluent les composantes optiques du système oculaire et les composantes neurologiques du système visuel. Ces deux dernières sont immatures à la naissance mais il existe un système rapide d'amélioration et de maturation visuelle. Le premier des processus normaux connus est l'emmétropisation¹⁹, qui évolue avec la croissance oculaire. Le nouveau-né est en effet spontanément hypermétrope²⁰ à la naissance du fait d'un globe oculaire plus court.

L'emmétropisation est réalisée pour 82 % des nouveau-nés à terme à l'âge d'un an [Brémond-Gignac *et al.*, 1994]. Les phénomènes de croissance oculaire se poursuivent sur plusieurs années. Le globe oculaire augmente en longueur axiale tandis que la cornée s'aplatit et que le cristallin s'ovalise. Cette évolution de la cornée et du cristallin permet de diminuer le pouvoir de réfraction du globe oculaire tandis que celui-ci s'allonge. Le fort pouvoir réfractif de la cornée et du cristallin à la naissance explique la faible hypermétropie relative des nourrissons alors que leur globe oculaire est de très courte longueur axiale. Durant le phénomène d'emmétropisation, les faisceaux lumineux sont focalisés de plus en plus précisément sur la rétine. Le deuxième processus normal qui intervient est la maturation des voies visuelles et du cortex visuel, naturellement liée à la maturation cérébrale. Les voies visuelles démarrent au niveau des cellules sensorielles visuelles (cônes et bâtonnets) puis se prolongent par les cellules bipolaires intra-rétiniennes (premiers neurones visuels) puis avec les cellules ganglionnaires (deuxièmes neurones visuels) dont les axones se réunissent au niveau de la papille optique. Ces axones forment le nerf optique qui émerge du globe oculaire pour se diriger vers le chiasma optique puis les tractus optiques et enfin aboutir au corps géniculé latéral. À ce niveau, il existe un relais synaptique avec les troisièmes neurones visuels. Ces neurones se prolongent par les radiations optiques pour aboutir au niveau du cortex occipital. Le développement du corps géniculé latéral situé au niveau du thalamus est donc particulièrement important en raison de ce relais. Le corps géniculé latéral est immature à la naissance, cependant le nombre de synapses augmente très rapidement dans les premiers mois, et cette croissance se ralentit à l'âge de 2 ans. La synaptogenèse au niveau du cortex cérébral est elle aussi très rapide après la naissance, avec un maximum de densité à l'âge de 8-9 mois, suivie par une perte synaptique stabilisée à l'âge de 11 ans [Garey, 1984]). La perte synaptique résulte probablement en une perte de plasticité neuronale.

Sur le plan rétinien, un nouveau-né possède trois fois moins de cônes qu'un adulte, ce qui explique en partie la faible acuité visuelle de celui-ci. La maturation des couches rétiniennes débute à l'âge de six semaines *in utero* et se poursuit de façon importante jusqu'à l'âge de huit mois *in utero* où toutes les couches rétiniennes sont individualisables. Dès la naissance intervient la maturation de la macula et de sa zone centrale, la fovéa. La densité fovéale des cônes (qui détermine en partie la résolution / définition visuelle) augmente de 18 cônes / 100 microns à l'âge d'une semaine postnatale jusqu'à 42 cônes / 100 microns à l'âge adulte. Il s'effectue une migration des cônes périphériques vers la zone centrale de la macula de façon à augmenter la densité de ceux-ci. La formation de la fossette fovéolaire (dépression au centre de la fovéa) contribue elle aussi à la densité des cônes centraux [Yuodelis et Hendrickson, 1986].

¹⁹ L'emmétropie est définie par une focalisation nette sur la fovéa d'un objet lointain. Cette situation correspond au système optique du globe oculaire normal.

²⁰ L'hypermétropie correspond à une focalisation en arrière de la rétine.

L'acuité visuelle peut être testée dès l'âge de trois mois grâce au test du regard préférentiel (appelé aussi « Bébé vision »). L'acuité visuelle mesurée serait d'environ un vingtième à la naissance, $1/10^{\text{ème}}$ à l'âge de un mois et $4/10^{\text{ème}}$ à l'âge de 1 an [Teller, 1982].

3.3.2 Développement de la vision binoculaire

L'existence d'une vision binoculaire et d'une vision stéréoscopique chez le jeune enfant nécessite comme préalable qu'une capacité de fixation et de fusion suffisante se soit développée. Or ces éléments ne sont pas présents, ou du moins n'ont pas une qualité suffisante dès la naissance.

Les nouveau-nés sont capables d'accrocher le regard et de « fixer » et suivre un objet attractif et tenu suffisamment proche. Il existe donc très probablement un réflexe de fixation dès les premières semaines de vie. Mais ce réflexe reste instable et de courte durée, comme le montre la clinique : l'enfant présente rapidement une instabilité clinique physiologique. Il existe des arguments cliniques et paracliniques qui amènent à suspecter que le nouveau-né est également capable de réaliser des mouvements de vergence dès le premier mois de vie. Toutefois, le réflexe de vergence se développe principalement vers la 5^{ème} ou 6^{ème} semaine de vie.

Si aucune vision stéréoscopique n'est détectable avant l'âge de 8 semaines [Birch *et al.*, 1983], des mesures réalisées à l'aide des « *random dot stereoacuity cards* » retrouvent une stéréoscopie faible (2,91 log secondes d'arc) dès la 9^{ème} semaine chez 50 % des jeunes enfants [Calloway *et al.*, 2001]. Celle-ci est de meilleure qualité (2,53 log secondes d'arc) et plus constante (97 % des enfants) dès la 17^{ème} semaine de vie. De même, les enregistrements PEV (potentiels évoqués visuels) lors de la présentation de tests stéréoscopiques permettent d'évoquer une perception du sens du relief dès l'âge de 4 mois [Reim *et al.*, 1989]. La ségrégation des colonnes de dominance et la maturation des cellules corticales sensibles à la disparité rétinienne apparaissent également vers le 4^{ème} mois de vie [Birch *et al.*, 1983]. Ces données ainsi que les délais de maturation décrits précédemment concernant le développement de la vision fine et de l'accommodation suggèrent que la vision stéréoscopique ne s'établit pas avant l'âge de 4 mois.

La vitesse de progression de la vision stéréoscopique en fonction de l'âge est difficile à apprécier et il existe de nombreuses données contradictoires. Il est bien établi que la vision stéréoscopique s'améliore rapidement au cours des deux premières années de la vie [Ciner *et al.*, 1996], [Ciner *et al.*, 1991], [Jandó, 2012], mais certains auteurs estiment que le seuil de la vision stéréoscopique normale se situe vers 300 à 250 secondes d'arc aux alentours de l'âge de 18 mois. Cependant, pour ces mêmes auteurs, la vision stéréoscopique présenterait une phase rapide de maturation au-delà de cet âge, maturation qui amènerait la vision stéréoscopique à des valeurs voisines de celles de l'adulte. Ainsi, à 30 mois, la vision stéréoscopique est en moyenne voisine de 125 secondes d'arc. À l'inverse, d'autres auteurs évoquent une possibilité de maturation beaucoup plus rapide de la vision stéréoscopique chez le jeune enfant, celui-ci pouvant avoir une stéréoscopie de l'ordre de 1 000 secondes d'arc vers 6 mois et 120 à 100 secondes d'arc dès 1 an. Au-delà, ces auteurs estiment une stéréoaucuité de l'ordre de 50 secondes d'arc comme étant normale à 24 mois [Birch et Salomao, 1998]. La vision humaine permet de détecter une différence de profondeur entre deux plans (ordre de grandeur : à un mètre, on perçoit une différence de profondeur de un millimètre).

La maturation de la fonction visuelle incluant la fonction oculomotrice se poursuit au moins jusqu'à l'âge de 12 ans (voir section suivante) [Stein et Kapoula, 2013]. Il a d'ailleurs été montré récemment que l'anatomie maculaire chez l'homme se développe jusqu'à l'âge de 13 ans environ [Hendrickson, 2012].

3.3.3 Récapitulatif des âges clef du développement visuel

Les tableaux ci-dessous récapitulent quelques âges clef du développement visuel pour différents aspects : la maturation des globes oculaires, l'emmétropisation, le développement de l'accommodation, de la binocularité, de la stéréoaucuité et la maturation des voies visuelles.

Tableau 1 : maturation des globes oculaires

Maturation des globes oculaires [Brémond-Gignac <i>et al.</i> , 2011][Rigaudière <i>et al.</i> , 2012]	
Diamètre antéro-postérieur	17 mm en moyenne à la naissance 20,8 mm vers 2 ans croissance quasi-définitive vers 4 ans : 22-24 mm
Cornée	11 mm en moyenne à la naissance 11,5 mm vers 2 ans
Cristallin	6 mm en moyenne à la naissance 8 mm vers 10 ans 8,5 mm à vers 20 ans
Volume du globe	Le volume double entre la naissance et environ 2 ans facteur 2,5 entre la naissance et l'âge adulte

Tableau 2 : emmétropisation à la fin de la deuxième année

Emmétropisation à la fin de la deuxième année	
Amétropie sphérique	Hypermétropie possible jusqu'à 3 ans puis emmétropisation atteinte avant 10 ans [Atkinson <i>et al.</i> , 2007]
Astigmatisme	Existe fréquemment la première année de vie et diminue fortement vers 18 mois [Atkinson <i>et al.</i> , 1980]

Tableau 3 : développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréoaocuité

Développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréoaocuité	
Estimation de l'accommodation	Mécanisme d'accommodation-vergence semblable à celui de l'âge adulte vers 3-4 mois [Banks, 1980], poursuite de l'amélioration jusqu'à 6 mois [Bobier <i>et al.</i> , 2000] Accommodation importante pendant la petite enfance : 6 à 10 dt vers 5 ans puis 5 à 8 dt vers 10 ans pour diminuer de 0,3 dt par an [Anderson <i>et al.</i> , 2008]
Axes visuels	s'alignent vers 3-4 semaines, fixation ou reprise de fixation possible dès l'âge de 2 mois
Binocularité	Apparaît vers la fin du 1 ^{er} ou du 2 ^{ème} mois. Vers les 3 premiers mois, elle correspondrait plus à une combinaison non sélective de l'image corticale provenant d'un œil ou de l'autre [Rigaudière <i>et al.</i> , 2012], la fusion binoculaire s'établit vers l'âge de 3 mois [Birch <i>et al.</i> , 1992] [Pigassou-Albouy, 2000]

Développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréoaucité	
Stéréoaucité	<p>La vitesse de progression de la vision stéréoscopique en fonction de l'âge est difficile à apprécier et il existe de nombreuses données contradictoires. Il est bien établi que la vision stéréoscopique s'améliore rapidement au cours des deux premières années de la vie [Ciner <i>et al.</i>, 1996].</p> <p>Mais certains auteurs estiment que le seuil de la vision stéréoscopique normale se situe vers 300 à 250 secondes d'arc aux alentours de l'âge de 18 mois. Mais, pour ces mêmes auteurs, la vision stéréoscopique présenterait une phase rapide de maturation au-delà de cet âge, maturation qui amènerait la vision stéréoscopique à des valeurs voisines de celles de l'adulte.</p> <p>Ainsi, à 30 mois, la vision stéréoscopique est en moyenne voisine de 125 secondes d'arc. À l'inverse, d'autres auteurs évoquent une possibilité de maturation beaucoup plus rapide de la vision stéréoscopique chez le jeune enfant, celui-ci pouvant avoir une stéréoscopie de l'ordre de 1 000 secondes d'arc vers 6 mois et 120 à 100 secondes d'arc dès 1 an. Au-delà, ces auteurs estiment une stéréoaucité de l'ordre de 50 secondes d'arc comme étant normale à 24 mois [Birch et Salomao, 1998].</p>

Tableau 4 : maturation des voies visuelles

Maturation des voies visuelles	
Voies de conduction	Largement dépendante de l'exposition à la lumière pour les voies de conduction et le cortex visuel primaire [Vital-Durand, 1983]
Nerf optique	La myélinisation du nerf optique commence dès la naissance, augmente rapidement jusqu'à 2 ans [Magoon et Robb, 1981] et se poursuit jusqu'à 10-11 ans
Corps géniculé latéral	Atteint son volume adulte vers l'âge de 6 mois, évolution des neurones géniculés jusqu'à 9 mois [De Courten et Garey, 1983]
Voies M et P	Voie M : maturité vers la fin de la 2 ^{ème} année [Rasengane <i>et al.</i> , 1997], voie P : maturité vers 10-11 ans [Gordon et McCulloch, 1999]
Cortex visuel primaire	Volume atteint sa taille adulte vers 4 mois, Stabilisation du nombre de synapses par neurone vers l'âge de 11 ans

Ces données ont été regroupées par le groupe de travail sous la forme d'un tableau exposé ci-dessous.

Tableau présentant les âges moyens des périodes de maturation du système visuel

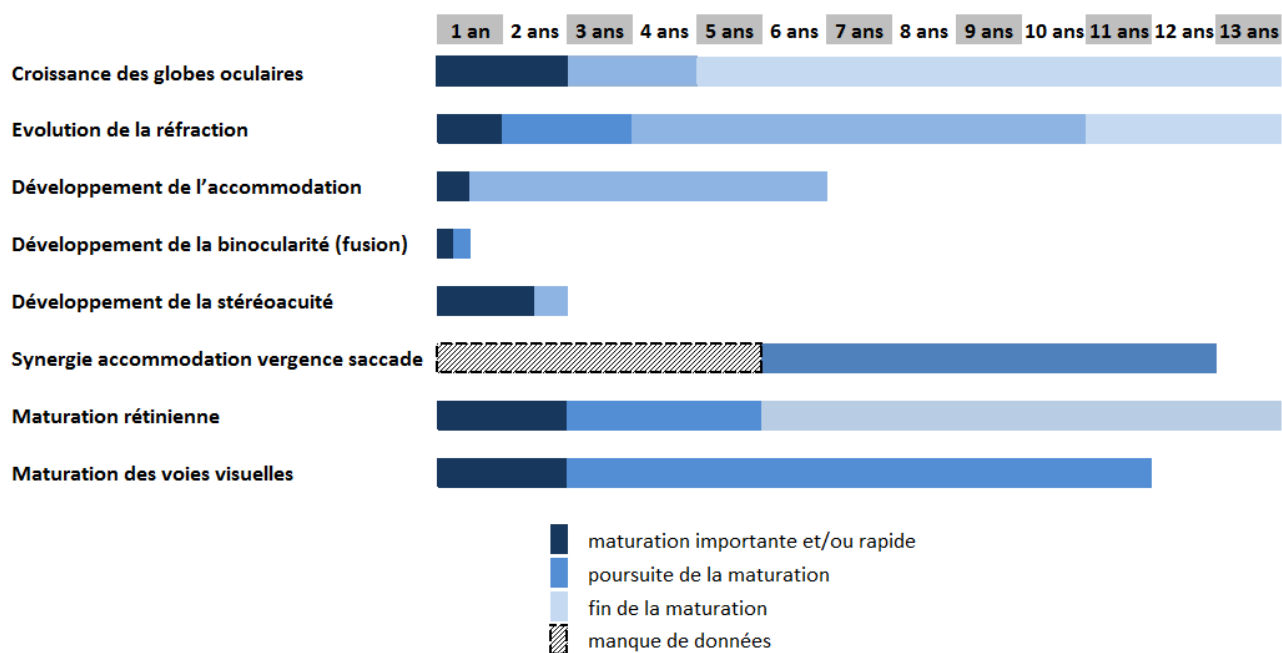


Figure 19 : tableau présentant les âges moyens des périodes de maturation visuelle

3.3.4 Développement visuel anormal

Il existe peu de données sur la prévalence exacte des anomalies visuelles chez les nourrissons et les petits-enfants. Une étude canadienne [Drover *et al.*, 2008] sur 946 enfants âgés de 1,6 à 11,6 ans a retrouvé 14 % d'anomalies visuelles significatives. Certaines de ces anomalies sont d'origine organique comme la cataracte ou le glaucome mais les problèmes les plus fréquents sont essentiellement l'hypermétropie (4,8 %), l'amblyopie (4,7 %) et le strabisme (4,3 %). La myopie (1,1 %) et l'anisométrie (1,4 %) sont relativement peu fréquentes. Différentes études ont montré l'existence d'une période sensible du développement visuel durant laquelle les enfants sont particulièrement vulnérables et cette fenêtre se situe de la naissance jusqu'à au moins l'âge de cinq ans. Deux types de mécanismes pathologiques peuvent survenir lors de cette période : il s'agit du mécanisme de déprivation (privation) visuelle et du mécanisme d'amblyopie.

3.3.4.1 Mécanisme de déprivation (privation) visuelle

Lors du processus normal d'emmétropisation, le globe oculaire augmente sa longueur axiale naturellement de façon à réduire l'hypermétropie. Dans le mécanisme de déprivation visuelle, la longueur axiale augmente de manière excessive et plus rapide lorsqu'il existe une vision trouble (cataracte partielle) ou une défocalisation des faisceaux lumineux sur la rétine périphérique dans le sens myopique (myopie) [Brémond-Gignac *et al.*, 2011]. Cette déprivation visuelle entraîne donc un cercle vicieux de la vision trouble, entraînant une augmentation de longueur axiale du globe oculaire soit une myopie. L'hypothèse de cette augmentation de longueur axiale serait une stimulation du système dopaminergique *via* la rétine, avec sécrétion de facteurs de croissance du globe oculaire [Liu, 2004] [Honda, 1996]). D'autres facteurs pourraient également être impliqués.

3.3.4.2 Mécanisme d'amblyopie

Chez le petit enfant, l'absence prolongée de stimulation visuelle par obstruction partielle ou complète du *stimulus* lumineux peut conduire à une amblyopie. L'amblyopie est d'origine organique et/ou fonctionnelle. L'amblyopie strabique est due au non-alignement oculaire et à la dominance d'un œil. L'amblyopie fonctionnelle est le plus souvent unilatérale. L'acuité visuelle d'un œil est réduite du fait de la dominance de l'autre œil. Cette baisse d'acuité visuelle s'accompagne d'une faible acuité stéréoscopique, d'une faible sensibilité au contraste et d'une faible sensibilité

aux mouvements. En pratique clinique, l'amblyopie fonctionnelle est dépistable aisément et peut être rééduquée si elle est détectée précocement. Le mécanisme causal de l'amblyopie fonctionnelle est constitué par le manque de transmission neuronale de l'œil atteint et il en résulte une atrophie au niveau du corps géniculé latéral [Hubel et Wiesel, 1959]. Ce risque est plus élevé chez les plus jeunes du fait de la plasticité neuronale. Heureusement, ceci signifie aussi que l'amblyopie peut être réversible et rééduquée si elle est détectée précocement.

3.4 Mécanismes de la perception de contenu 3D en condition d'interfaçage ou *via* une interface

Avant d'aborder les technologies des interfaces visuelles, il faut préciser les différentes fonctionnalités que l'on peut employer pour voir un espace en trois dimensions. Ces fonctionnalités se réfèrent aux caractéristiques de la vision humaine. Car il faut bien retenir que c'est *l'observateur* qui réalise la perception 3D de l'espace et non la technologie.

3.4.1 Les différentes fonctionnalités exploitées

Différentes fonctionnalités (voir Figure 20) peuvent être employées pour voir un espace en trois dimensions :

- N° 1, la fonctionnalité la plus simple, « affichage monoscopique », est de projeter l'espace 3D sur un plan, donc sur un écran monoscopique, en exploitant tous les indices monoculaires. Il faut noter qu'au début du développement des images de synthèse, certains indices étaient peu ou mal exploités (variation de l'éclairage et de la texture). Dans cette fonctionnalité N°1, l'indice « parallaxe due aux mouvements » n'est exploité qu'en faisant tourner le point de vue sur l'espace observé, réel ou virtuel, par le concepteur des images (par exemple, par un mouvement de caméra ou par la rotation sur eux-mêmes des objets visualisés) ;
- N° 2, la fonctionnalité « affichage monoscopique avec contrôle du changement de point de vue », consiste toujours à projeter l'espace 3D sur un écran monoscopique, mais avec contrôle de l'image affichée par l'observateur lui-même. Cette fonctionnalité exploite l'indice de parallaxe de mouvement de façon plus avancée. Il y a deux sous cas :
 - soit l'écran est fixe et la tête de l'observateur est traquée, et donc en se déplaçant, l'observateur perçoit la conséquence de son changement de point de vue sur l'affichage ;
 - soit l'écran est mobile (du type tablette numérique) et c'est la position de l'écran lui-même (mesurée par un capteur d'orientation) qui contrôle le point de vue montré à l'observateur ;
- N° 3, la fonctionnalité « affichage stéréoscopique fixe » exploite les indices monoculaires et binoculaires en même temps. C'est le cas classique pour le cinéma et la télévision 3Ds. La perception de la profondeur, de la troisième dimension, est donc améliorée (« augmentée ») par rapport à la fonctionnalité N°1 « affichage monoscopique ». À noter que la fonctionnalité N°2 « affichage monoscopique avec contrôle du changement de point de vue » permet une meilleure perception de la profondeur que la troisième fonctionnalité « affichage stéréoscopique fixe » pour la perception des formes [Leroy *et al.*, 2009]. Notons aussi que la perception en profondeur, en n'exploitant strictement que des indices binoculaires, est réalisée d'une façon anecdotique dans les stéréogrammes de points aléatoires et techniques associées ;
- N° 4, la fonctionnalité « affichage stéréoscopique avec contrôle du changement de point de vue » rassemble les fonctionnalités 2 et 3, permettant (théoriquement) une meilleure perception de la troisième dimension.

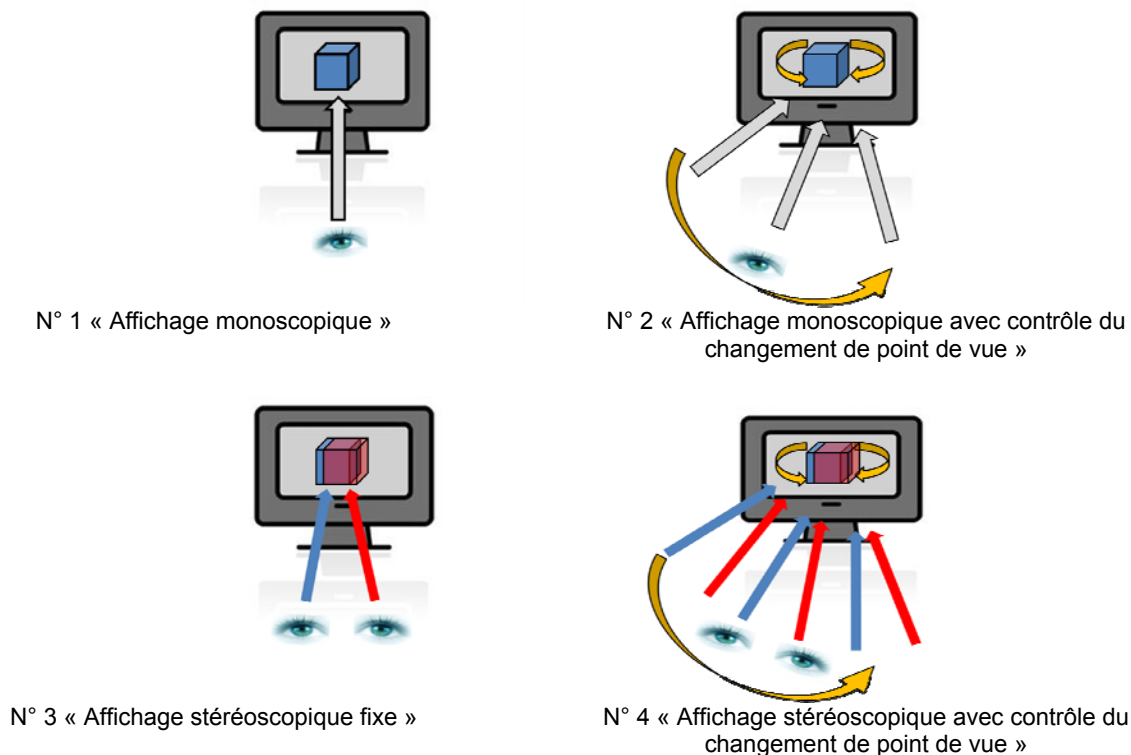


Figure 20 : présentation des différentes fonctionnalités pour voir un espace en 3 dimensions

La perception sera plus proche d'une perception naturelle et fournira des informations plus réalistes dans les fonctionnalités 3 et 4 si les images sont projetées en *vision orthostéréoscopique*, c'est-à-dire que les échelles de profondeur sont en concordance pour les indices monoculaires et binoculaires, ce qui n'est pas toujours le cas. Les images stéréoscopiques aériennes prises à haute altitude en sont un contre-exemple : les bâtiments ne sont pas perçus à leur taille réelle mais paraissent très petits, comme dans une maquette de la région observée.

Si on peut mesurer le mouvement des yeux de l'observateur, on peut traiter les images stéréoscopiques pour améliorer le confort visuel et la perception de la profondeur, mais cela ne crée pas une nouvelle fonctionnalité (dans la mesure où cela ne fournit aucune information supplémentaire sur la taille ou la profondeur des objets observés). Ce cas n'est envisagé actuellement que dans des travaux de recherche.

4 État de l'art des technologies « 3Ds » existantes

Cette partie décrit la représentation de contenu d'images filmées (vidéo 3D), puis la création des contenus des images stéréoscopiques par caméras (cinéma et télévision) pour terminer par les technologies de restitution de ces images à l'observateur.

La création spécifique des images de synthèse stéréoscopiques n'est pas abordée, car les règles de conception de contenu pour le confort visuel, présentées en partie 5, sont suffisantes pour la compréhension des techniques employées.

4.1 Représentation de contenu

Une représentation efficace du contenu est indispensable pour le succès des applications de vidéo 3D (c'est-à-dire pour toute vidéo ayant un contenu tridimensionnel, pas seulement stéréoscopique, comme expliqué par la suite). Cet élément est étroitement lié aux autres composants d'un système de vidéo 3D : l'acquisition, la transmission, le rendu et l'affichage. La représentation a également un impact significatif sur la performance globale du système, y compris les besoins en bande passante et la qualité visuelle pour l'utilisateur final, ainsi que des contraintes telles que la rétro-compatibilité avec les équipements et infrastructures existants.

Dans l'éco-système actuel, une variété de formats vidéo, de schémas de codage et de technologies d'affichage coexistent. Dans ce contexte, la normalisation est un élément clé pour les acteurs du marché pour garantir l'interopérabilité et promouvoir l'adoption par le plus grand nombre. Plusieurs représentations et formats ont été proposés pour la vidéo 3D ([Mueller *et al.*, 2010], [Vetro *et al.*, 2011a], [Cagnazzo *et al.*, 2013]).

4.1.1 Contenus stéréoscopiques 3D (3Ds)

La représentation 3Ds est la plus ancienne, la plus simple et la plus largement utilisée pour la vidéo 3D. Par exemple, la majorité des films en 3D et des services de télévision en 3D à ce jour s'appuient sur cette représentation.

La représentation 3Ds est basée sur le principe de la stéréoscopie. À savoir, deux vues avec un écart, appelées vues de gauche et de droite, sont respectivement reçues par les yeux gauche et droit d'un observateur. La disparité binoculaire résultante est ensuite exploitée par le cerveau pour créer une perception de profondeur. Un exemple de paires (vue gauche et droite) est illustré par la Figure 21 [Zitnick *et al.*, 2004].



Figure 21 : représentation « stéréoscopique 3D », exemple de vues gauche et droite

L'un des avantages de la représentation 3Ds est que l'acquisition des données est relativement facile. Cette représentation est également efficace en matière de bande passante et de stockage

requis. En outre, elle est bien adaptée pour les technologies actuelles de visualisation stéréoscopique, y compris les systèmes passifs avec des lunettes polarisées ou les systèmes actifs comme ceux utilisant des lunettes à obturation par cristaux liquides.

Cependant, la représentation 3Ds présente également un certain nombre d'inconvénients majeurs. Tout d'abord, elle ne fait qu'ajouter une information de profondeur, la disparité binoculaire, et ne permet donc pas une expérience 3D complète (par changement de point de vue, fonctionnalité N°4). Deuxièmement, il est souhaitable de dissocier la représentation des données et les caractéristiques d'affichage. Toutefois, avec la représentation 3Ds, le contenu vidéo est figé pour une condition de visualisation spécifique, tel que déterminé par la distance interaxiale.

4.1.2 Contenu multivue (*Multiview Video - MVV*)

La représentation MVV est une extension directe de la représentation 3Ds, avec plusieurs vidéos (texture) acquises de manière synchrone par un système de caméras. Une illustration de la représentation qui en résulte est donnée dans la Figure 22.



Figure 22 : représentation MVV (*Multiview Video*), exemple de N vues

De toute évidence, avec une représentation MVV composée de N vues, le débit de données brutes est multiplié par N . Cela génère typiquement une énorme quantité de données, et nécessite donc une compression puissante.

4.1.3 Contenu avec carte de profondeur

Dans la représentation « vidéo-plus-profondeur », une vidéo (texture) est augmentée avec un canal supplémentaire comprenant l'information de profondeur. Cette représentation permet la synthèse d'un certain nombre de points de vue, et est donc indépendante des caractéristiques d'affichage.

La carte de profondeur est une image en niveaux de gris, où chaque pixel correspond à une valeur de profondeur représentant la distance entre le point correspondant dans la scène 3D et la caméra.

La représentation vidéo-plus-profondeur est illustrée en Figure 23, avec un exemple d'une image vidéo 2D et la carte de profondeur associée.



Figure 23 : représentation vidéo-plus-profondeur, exemple d'une vidéo et de la carte de profondeur correspondante

Une des difficultés de cette représentation est d'obtenir une carte de profondeur précise. Avec cette représentation, le flux vidéo offre une rétro-compatibilité avec les périphériques existants, et la représentation est indépendante du format de codage. En outre, cette représentation supporte les technologies avancées de traitement d'affichage stéréoscopique. Plus précisément, de nouvelles vues peuvent être synthétisées en utilisant la technique *Depth-Image-Based-Rendering* (DIBR) [Kauff *et al*, 2007]. De cette façon, la perception de profondeur peut être adaptée au récepteur, en fonction des caractéristiques d'affichage et les conditions d'observation.

4.1.4 Contenu multivues avec carte de profondeur (*Multiview Video-plus-Depth - MVD*)

Avec la représentation MVD, chacune des N vues est acquise avec la carte de profondeur associée, comme illustré en Figure 24. Ces informations permettent de reconstruire la géométrie 3D de la scène avec une précision bien meilleure que celle obtenue à partir des représentations MVV ou vidéo-plus-profondeur.

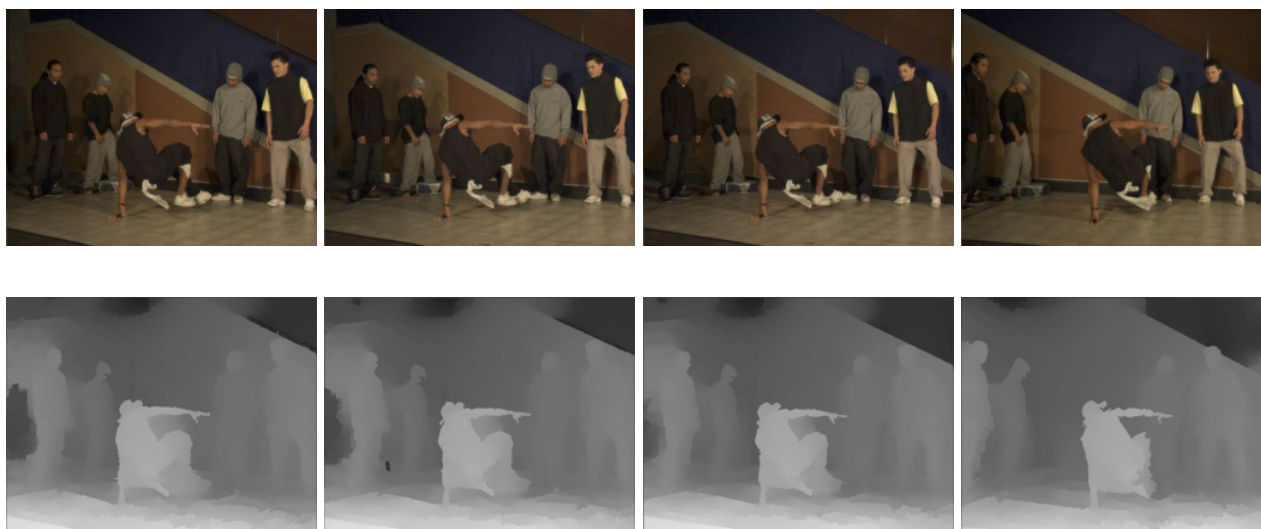


Figure 24 : représentation MVD: exemple de N vues et des cartes de profondeur correspondantes

4.2 Création de contenu avec images réelles

4.2.1 Contenu stéréoscopiques 3D (3Ds) et multivues (*Multiview Video - MVV*)

La méthode la plus simple pour créer du contenu 3Ds est d'utiliser deux caméras, côte à côte, comme illustré dans la Figure 25. Deux géométries sont possibles pour les caméras : parallèle ou convergente. Dans ce dispositif, la distance entre les deux caméras, ou *baseline*, détermine la

quantité de disparité entre les vues gauche et droite, et par conséquent l'impression de relief. Par ailleurs, une correction géométrique et chromatique des vues gauche et droite est généralement nécessaire.

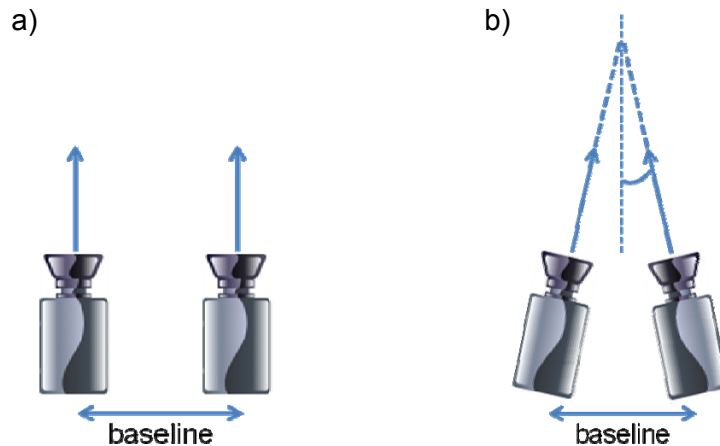


Figure 25 : dispositif 3Ds avec deux caméras côte à côte ; a) géométrie parallèle, b) géométrie convergente

Une limitation du dispositif ci-dessus est que la distance entre les deux caméras ne peut pas être choisie arbitrairement petite, en raison de la taille des deux caméras. Afin d'y remédier, une alternative consiste à utiliser deux caméras perpendiculaires avec un miroir semi-transparent, comme illustré dans la Figure 26.

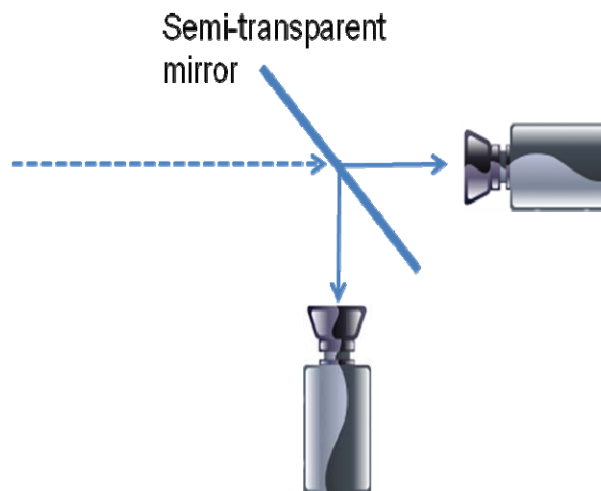


Figure 26 : dispositif 3Ds avec deux caméras perpendiculaires et un miroir semi-transparent

Dans le cas MVV, on utilisera simplement un dispositif similaire à celui de la Figure 25, mais avec N caméras.

4.2.2 Contenu avec carte de profondeur et multivues avec carte de profondeur (Multiview Video-plus-Depth - MVD)

Dans ces représentations, une carte de profondeur représentant la distance entre le point correspondant dans la scène 3D et la caméra doit être créée.

Cette carte peut être dérivée à partir d'un contenu vidéo stéréo au moyen d'estimations de disparité [Scharstein et Szeliski, 2002]. Une autre approche consiste à calculer l'information de profondeur à partir de séquences vidéo monoscopiques par conversion vidéo 2D-3D [Zhang *et al.*, 2011]. Cependant, une conversion automatique reste un problème difficile. Enfin, une caméra de

profondeur peut être utilisée pour acquérir directement la carte de profondeur. Par exemple, les dispositifs basés sur le principe du temps de vol peuvent être utilisés à cet effet [Foix *et al.*, 2011], avec une impulsion de lumière et un capteur destiné à capter une scène en trois dimensions.

4.3 Technologies de restitution (affichage)²¹

4.3.1 Présentation des interfaces visuelles « 3Ds »

Les écrans classiques, donc monoscopiques, sont utilisés comme interface visuelle 3Ds en donnant souvent entière satisfaction pour la télévision, les jeux vidéo, la bureautique... en exploitant les indices monoculaires pour représenter un espace 3D. Les écrans ont évolué dernièrement par l'augmentation de leur taille et de leur résolution (en nombre de pixels).

Toutes les interfaces visuelles stéréoscopiques sont composées d'un ou de plusieurs écrans. Il y a différentes combinaisons possibles, mais quelle que soit la technique employée pour la vision stéréoscopique, l'objectif est toujours le même : fournir à chaque œil une image différente. Pour ceci, il y a deux principes : soit on place près des yeux deux petits écrans (cas des visiocasques), soit on sépare techniquement les deux images affichées sur un seul écran (ou ensemble d'écrans). Dans cette catégorie de systèmes à support fixe, le principe repose sur un dispositif technique permettant de séparer les images pour ne visualiser sur chaque œil que l'image désirée. La sous-classification qui suit est donc fonction du lieu où se fait cette séparation et du type de dispositif employé : soit au niveau de l'écran, soit au niveau des yeux par le port d'une paire de lunettes.

- Séparation des images stéréo au niveau de l'écran (3 catégories)

Écran auto-stéréoscopique avec illumination

Inventé en 1987 par Kaneko, l'écran est un ensemble de deux plans : l'un est un écran à cristaux liquides, l'autre juste derrière est composé de fines colonnes illuminées séparées entre elles par des zones sombres. Il y a une colonne de lumière pour deux colonnes de pixels de l'écran à cristaux liquides. Chaque colonne de lumière est espacée de telle façon qu'un observateur dans une bonne position voit celle-ci à travers la colonne paire de pixels avec son œil gauche, et à travers la colonne impaire de pixels avec son œil droit. Les pixels ne sont visibles dans ce dispositif que s'ils sont éclairés (Figure 27) :

²¹ Le texte et les figures de la partie 4.3 sont issus du « Traité de la Réalité Virtuelle » de P. Fuchs et G. Moreau, éditeur les Presses des Mines [Fuchs et Moreau, 2006].

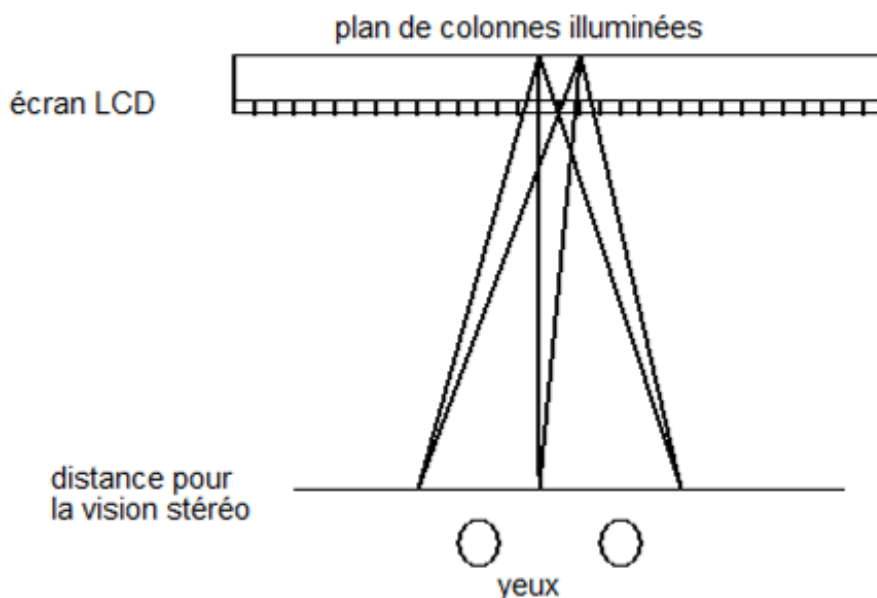


Figure 27 : principe de la vision avec écran auto-stéréoscopique à illumination

Écran auto-stéréoscopique avec réseau lenticulaire

Le principe est le même que celui des photos en relief. L'écran est recouvert d'un réseau lenticulaire : un plan composé de lentilles demi-cylindriques d'axes parallèles aux colonnes de l'écran. Celles-ci ont des caractéristiques optiques qui impliquent que chaque œil de l'utilisateur voit des colonnes différentes de pixels, correspondant à deux images différentes. Derrière chaque lentille cylindrique, on a pour chaque œil une ou plusieurs colonnes de pixels (jusqu'à une trentaine actuellement). S'il y en a plusieurs, en déplaçant légèrement la tête, l'observateur voit la scène affichée en continu sous différents points de vue. Dans ce cas, on ajoute à l'indice binoculaire un indice de parallaxe exploitant le mouvement de la tête. Mais ce changement de point de vue n'est possible que sur une petite portion d'espace (Figure 28) :

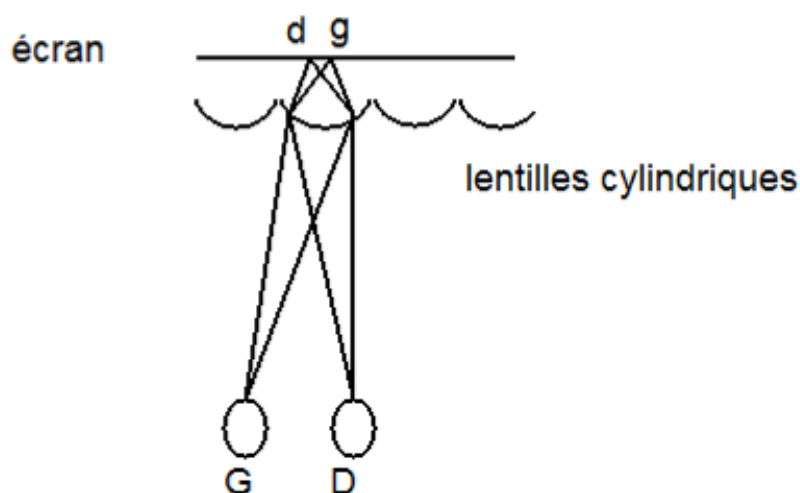


Figure 28 : principe de la vision avec écran auto-stéréoscopique à réseau lenticulaire

Plusieurs sociétés commercialisent des écrans utilisant cette technologie. Les écrans plats sont maintenant utilisés, car il est plus facile dans ce cas d'aligner les colonnes de pixels avec les lentilles cylindriques. C'est la principale difficulté technique des écrans auto-stéréoscopiques, surtout pour ceux de grandes dimensions. L'avantage principal de ces

écrans auto-stéréoscopiques est de permettre à l'observateur de ne porter aucune lunette (grand intérêt dans les lieux publics pour une vision immédiate). Mais, en conséquence de la possibilité de plusieurs points de vue, l'inconvénient est de diminuer la résolution horizontale.

Écran auto-stéréoscopique à barrières de parallaxe

Dans ce cas, c'est sur un principe d'occultation que chaque œil ne percevra qu'une colonne sur deux. Son principe repose sur un filtre (la barrière) qui occulte en alternance les images droites et gauches destinées à l'un ou l'autre des deux yeux (cf. Figure 29). Comme pour le réseau lenticulaire, un bon positionnement du spectateur est nécessaire. Dans ce cas, les positions latérales pour bien voir l'image entière sont toutes à la même distance du plan de l'image. Cette technologie est, entre autres, utilisée par l'écran de station de jeux Nintendo 3Ds (cf. expertise de l'Anses publiée en 2011).

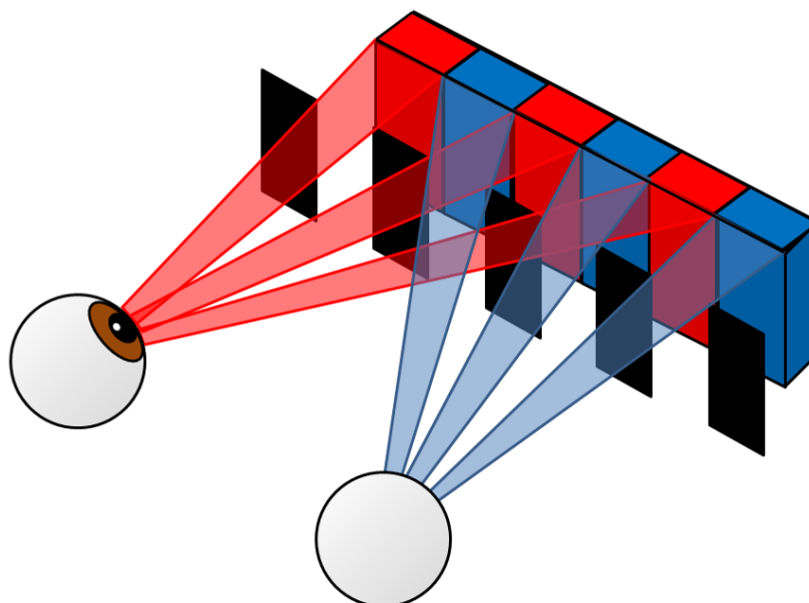


Figure 29 : principe d'un écran auto-stéréoscopique à barrières de parallaxe

- Séparation des images stéréoscopiques au niveau des lunettes (3 catégories)

Séparation par procédé anaglyphe

Le procédé ancien et bien connu avec des lunettes bicolores (procédé anaglyphe) permet facilement et à faible coût de créer sur une feuille ou sur un écran une vision stéréoscopique, mais avec une perte de la qualité de rendu des couleurs. Chaque œil ne voit qu'une des deux images de couleur différente, par exemple rouge et cyan (la couleur complémentaire du rouge), grâce à deux filtres sur la paire de lunettes.

Séparation par filtrage colorimétrique

Une nouvelle approche de filtrage colorimétrique a été mise au point pour améliorer la restitution des couleurs et est utilisée commercialement. Chaque œil de l'observateur reçoit une image filtrée différemment sur les composantes R (rouge), V (vert) et B (bleu) du spectre des couleurs. Ceci est possible en mettant une paire de lunettes ayant deux filtres colorimétriques différents et en équipant le ou les vidéoprojecteurs.

Séparation par lunettes à obturateur électronique (lunettes actives)

Ces lunettes sont composées de deux écrans à cristaux liquides qui obturent alternativement (par exemple 60 fois par seconde) chaque œil, pendant que le moniteur affiche le couple d'images stéréoscopiques à la fréquence double (Figure 30). La fréquence normale de l'écran plat ou du vidéoprojecteur est donc doublée pour éviter le scintillement des images sur chaque œil. La synchronisation entre l'affichage et les paires de lunettes est assurée par des liaisons infrarouges. Ces lunettes doivent avoir une pile pour l'alimentation des obturateurs à cristaux liquides. Le coût et le poids sont donc plus importants que pour les lunettes passives (voir paragraphe suivant). Un autre inconvénient est que ces lunettes font perdre de l'intensité lumineuse (au moins un tiers). La difficulté technique majeure est de n'afficher au bon instant que l'image désirée sans empiètement d'une image sur l'autre (phénomène appelé *crosstalk* ou *ghosting*). Les temps d'ouverture se sont améliorés depuis l'évolution du marché vers le grand public, passant de 3 ms à moins de 1 ms, suffisamment petits pour empêcher le chevauchement des images.



Figure 30 : principe de la vision stéréoscopique avec lunettes actives, on voit le capteur infrarouge au milieu des lunettes

Séparation par lunettes polarisantes (lunettes passives) :

Devant l'écran TV ou devant le (ou les deux) vidéoprojecteur(s) est placé un écran à cristaux liquides permettant une polarisation de la lumière différente dans le temps pour chaque couple d'images stéréoscopiques. Avec des lunettes ayant deux filtres ne permettant que la transmission de l'image désirée pour chaque œil, le (ou les) observateur(s) voit (voient) l'affichage en relief. À noter que les lunettes passives sont plus légères et font perdre moins d'intensité lumineuse que les lunettes actives.

La polarisation des images est soit une polarisation croisée à 90° (la moins performante et la moins chère pour les lunettes), soit une polarisation « circulaire ». L'inconvénient de cette technologie en usage de vidéoprojection est l'installation d'un écran métallisé onéreux pour assurer une réflexion optimale de la polarisation, sans quoi il serait impossible d'avoir un rendu 3D de qualité.

Visiocasque

Les visiocasques (traduction de « *Head Mounted Display* ») présentent une image à chaque œil à l'aide de deux petits écrans solidaires de la tête quelle que soit sa position. L'intérêt théorique est une vision stéréoscopique avec la possibilité d'une grande flexibilité d'exploration de l'espace visuel. En plus de la vision stéréoscopique (partielle ou totale),

ces appareils disposent d'un capteur de localisation de la tête de l'utilisateur permettant d'afficher les images correspondant à la direction de son regard. En position fixe de la tête, le champ de vision d'un visiocasque n'est pas aussi grand que naturellement (ordre de grandeur : 120 degrés maximum au lieu de 180 degrés horizontalement), mais donne néanmoins une impression d'immersion visuelle. Il existe différentes technologies de visiocasques : à tube cathodique ou à cristaux liquides. La distance interpupillaire est en général réglable pour s'adapter à celle de la personne, de même que le réglage de la netteté des images. Le capteur de localisation, les écouteurs, un microphone éventuellement, et une partie de l'électronique sont incorporés au casque, tout en essayant de ne pas trop l'alourdir. La résolution des écrans utilisés dans les visiocasques reste encore relativement faible.

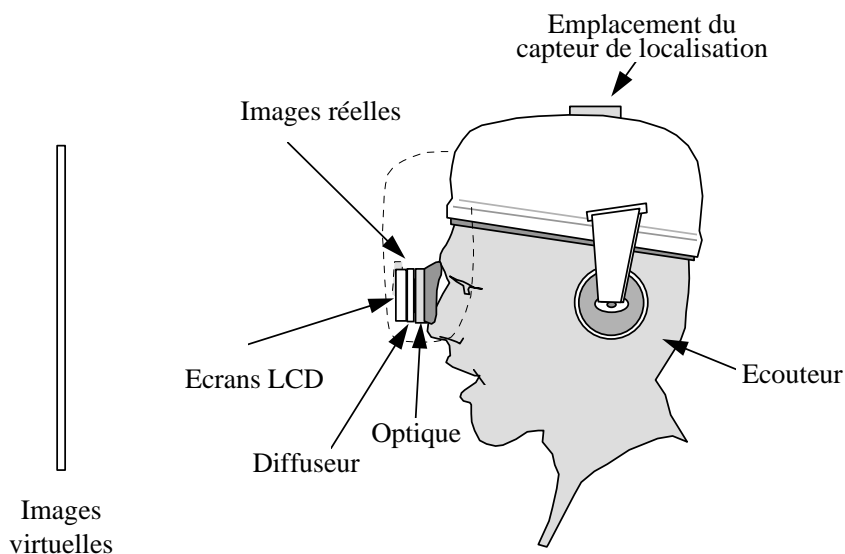


Figure 31 : schéma de principe d'un visiocasque à écrans LCD

4.3.2 Contexte de visualisation

Les dimensions des écrans composant les interfaces visuelles stéréoscopiques peuvent être très variables : du petit écran stéréoscopique du *smartphone* à l'écran d'une géode.

Au-delà des écrans d'ordinateurs et de télévision en relief, il y a des interfaces visuelles composées souvent de plusieurs vidéoprojecteurs et d'un ou plusieurs écrans suffisamment grands, à taille humaine, pour permettre l'immersion dans un grand champ de vision d'un ou de plusieurs observateurs. Ces dispositifs sont exploités en général pour représenter la scène virtuelle ou une scène réelle (cinéma) à l'échelle 1 ou au-delà. Plusieurs vidéoprojecteurs peuvent être employés afin d'augmenter la résolution de l'image globale, ce qui est nécessaire si on veut couvrir un grand champ de vision.

4.3.2.1 Salle de cinéma en relief

Suite au passage de la projection analogique à la projection numérique des films, la plupart des salles de cinéma peuvent maintenant projeter des films stéréoscopiques. Les projecteurs sont en général de résolution 2K et évoluent vers le 4K (4096 par 2160 pixels). Les dimensions des salles de cinéma sont très variables, le format de l'image et la disposition des spectateurs a par ailleurs considérablement évolué. La taille d'une salle de cinéma peut aller de quelques dizaines de places à un millier (les écrans : de 4 à plus de 20 mètres de base en France). Actuellement, dans les salles en amphithéâtre, les derniers rangs sont à une distance comprise entre trois et quatre hauteurs d'écran, alors que le premier rang se situe à une distance avoisinant la hauteur d'écran.

La Commission supérieure technique de l'image et du son (CST) préconise, par sa recommandation CST-RT-012-P-2003, une distance minimale de confort visuel pour la première rangée égale à la largeur de l'écran réduite d'un facteur 0,8. Celle de la dernière rangée est recommandée inférieure ou égale au double de la largeur d'écran. La réalité de l'exploitation se situe plus proche de la norme NF S27001 : facteur minimum pour le premier rang de 0,6 et maximum pour le dernier rang de 2,9.

4.3.2.2 Salle immersive

Une salle immersive est une interface de visualisation composée d'un ensemble de vidéoprojecteurs (trois au minimum) permettant l'affichage d'une image à haute résolution sur grand écran, plat ou semi-cylindrique pour quelques dizaines de personnes. Dans le cas d'un écran semi-cylindrique, le champ de vision couvert pour l'observateur central est de 160 à 180° en général (Figure 32).



Figure 32 : salle immersive avec écran semi-cylindrique

4.3.2.3 Visiocube ou « Cave »

Un autre type d'interface visuelle à taille humaine est le visiocube (« Cave » en anglais du nom du premier produit de ce type d'interface) qui est un ensemble d'écrans formant quelques faces (de 4 à 6) d'un cube de 2 à 4 mètres de côté environ). Le visiocube est un dispositif immersif mono-utilisateur à vocation interactive. Si on veut correctement voir dans un visiocube, il faut que l'utilisateur soit celui qui a la tête traquée pour lui fournir en temps réel le bon point de vue. Autrement, les raccordements entre les différentes images planes ne sont pas visuellement corrects. Les visiocubes sont équipés de projecteurs qui affichent les images sur les faces extérieures, par réflexion (Figure 33). Les images projetées sont en relief, l'utilisateur étant alors équipé de lunettes stéréoscopiques.

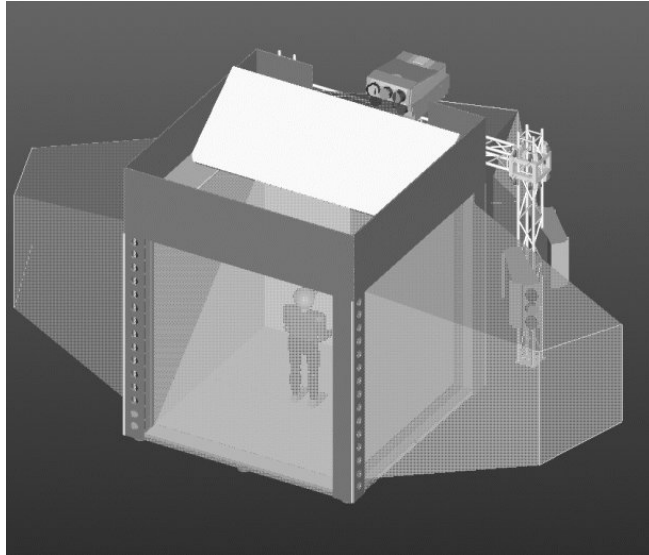


Figure 33 : le SAS3, visiocube transportable et multi plate-forme de Clarté à Laval

Il existe d'autres configurations d'interfaces visuelles stéréoscopiques tels que les « bureaux immersifs », composés d'un ou de deux écrans de dimensions d'une planche à dessin, des « fenêtres immersives », composées d'un écran suspendu orientable, etc.

4.3.3 Domaines d'usage de la 3Ds

4.3.3.1 Généralités

L'usage de la 3D stéréoscopique est plus fréquent de nos jours car son coût a baissé grâce au passage des techniques analogiques aux techniques numériques. Cette évolution concerne les applications grand public comme les applications professionnelles. L'exploitation d'un interfaçage visuel stéréoscopique a plusieurs avantages pour l'observateur :

- avantage N°1 : l'effet spectaculaire d'une vision d'entités (personnages, objets, etc.) perçues en dehors du plan de l'écran de projection. L'observateur est plus immergé au niveau sensoriel²² ;
- avantage N°2 : une meilleure perception de la profondeur de l'espace observé. Cette augmentation peut concerner la perception :
 - de la forme d'un objet, d'une structure complexe ou d'un grand ensemble de données plus aisés à identifier et à observer ;
 - des distances entre entités dans le sens de la profondeur.

Rappelons qu'en vision naturelle, la vision binoculaire permet une meilleure perception de la profondeur à courte distance (quelques mètres). Il en sera donc de même en vision artificielle avec une vision orthostéréoscopique²³. Mais sans le respect de la vision orthostéréoscopique, il est toujours possible de créer des images stéréoscopiques à partir de deux points de vue plus écartés que la distance interpupillaire (65 mm), ce qui se produit, par exemple, avec les vues aériennes et satellitaires pour la cartographie (avec un effet de compression de l'espace observé dans la direction de la profondeur, « l'effet maquette ») ;

²² Il est aussi plus immergé au niveau sensoriel si on augmente son champ de vision (jusqu'à 180° dans une géode). Au niveau cognitif, l'aspect immersif du sujet dépend de nombreux autres facteurs.

²³ Les échelles de profondeur sont en concordance pour les indices monoculaires et binoculaires.

- avantage N°3 : une colocalisation du sujet dans un environnement virtuel dans lequel le sujet peut interagir à l'échelle 1 par son corps (Figure 34). La colocalisation impose aussi que l'espace de perception du sujet se juxtapose à son espace d'action corporelle, principalement par ses mains), exploitée dans les techniques de Réalité Virtuelle²⁴ et peut-être dans l'avenir dans certains jeux-vidéos.

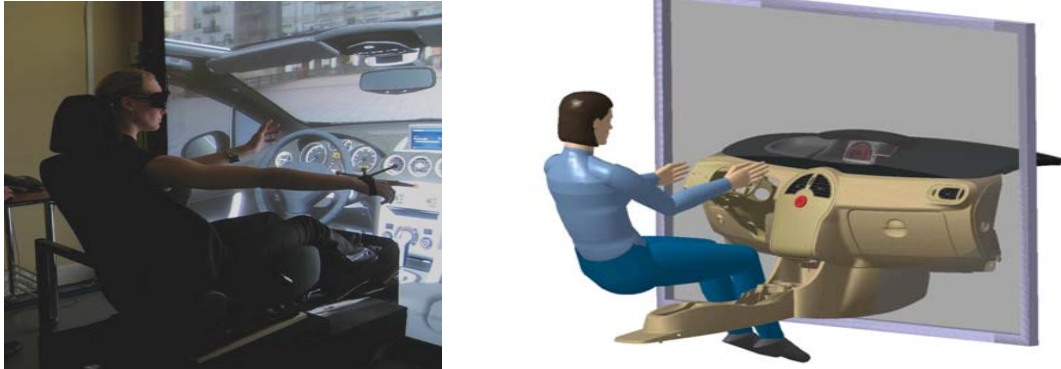


Figure 34 : exemple de colocalisation pour une étude ergonomique de planche de bord, avec l'espace perçu visuellement correspondant à l'espace corporel du conducteur

Il ne faut pas penser que l'interfaçage visuel stéréoscopique remplacera toutes les applications d'interfaçage visuel monoscopique, car la vision stéréoscopique impose des contraintes sur le système visuel de l'observateur pour une augmentation de la perception de la profondeur d'un espace tridimensionnel qui n'est pas toujours utile.

4.3.3.2 Usages dans les domaines grand public

L'exploitation de la vision stéréoscopique, notamment les images en relief, existe depuis plus d'un siècle, avec périodiquement des regains d'intérêts du public. Les techniques analogiques de la 3Ds étant contraignantes dans le passé, l'exploitation des images en relief fut toujours limitée et épisodique. Mais, à présent, avec la baisse des coûts de la 3Ds grâce aux techniques numériques, le grand public peut avoir accès aisément à la 3Ds, que ce soit dans un lieu public ou à son domicile.

Actuellement, l'usage le plus répandu est pour le cinéma, dans les films dits « 3D ». L'avènement de la 3Ds a ainsi poussé les scénaristes à revoir leur façon de concevoir un film ou un court-métrage. Les projections des films en stéréoscopie devraient se développer en parallèle avec les projections des films en monoscopie (les films en stéréoscopie sortent souvent aussi en version monoscopique). Les films en stéréoscopie sont un art cinématographique nouveau qui ne devrait pas occulter les films en monoscopie. C'est l'avantage N° 1, cité précédemment, qui est surtout exploité dans cet usage.

Un autre usage est la télévision en vision stéréoscopique, avec les téléviseurs dits « 3D ». Le développement d'émissions 3Ds et de chaînes spécifiques 3Ds est en cours avec un usage plus ou moins intensif. C'est l'avantage N°1, cité précédemment, qui y est surtout exploité. Il est difficile actuellement de prévoir si l'usage de la télévision 3Ds sera important en matière d'audience et de durée d'observation. Il faut noter que, si pour le cinéma 3Ds la durée (2 heures environ) et la fréquence d'usage sont faibles, elles pourraient être théoriquement très importantes pour des téléspectateurs regardant plusieurs heures par jour la télévision. Si celle-ci est vue très souvent en vision stéréoscopique, il est à craindre des effets sanitaires sur les téléspectateurs. Ces effets

²⁴ En Réalité Virtuelle, la vision stéréoscopique est indispensable techniquement lorsque le sujet est immergé dans un visiocube ou CAVE (plusieurs écrans perpendiculaires entourant le sujet) pour ne pas trop percevoir les angles entre les écrans.

seront relativement plus importants pour des téléspectateurs se rapprochant trop du téléviseur 3Ds, et / ou augmentant exagérément les disparités rétinienne, s'ils ne les contrôlent pas en limitant les parallaxes horizontales absolues de leur téléviseur.

Un autre usage est le jeu-vidéo en vision stéréoscopique. Les remarques précédentes pour la télévision 3Ds s'appliquent. Mais, dans les jeux-vidéos, le sujet n'est plus un simple observateur puisqu'il peut interagir dans l'environnement virtuel. L'avantage N° 1 n'est plus seul à être exploité. La meilleure perception de la profondeur, l'avantage N° 2, peut être aussi un atout pour certains jeux. L'avantage N° 3, la colocalisation, pourrait être aussi dans l'avenir proposé avec l'essor des jeux-vidéos avec « immersion corporelle » du joueur grâce aux nouvelles interfaces (périphériques) détectant les mouvements du corps, ou une partie de celui-ci (ses mains ou sa tête).

Un usage pour des groupes de spectateurs est l'exploitation de la vision stéréoscopique dans des parcs d'attraction, des expositions scientifiques, des lieux similaires de visualisation (sites historiques, touristiques, etc.) et d'activités événementielles. C'est l'avantage N° 1 qui y est surtout exploité. Il en est de même pour la photographie en relief qui est depuis longtemps exploitée par des amateurs, dont ceux du stéréoclub français (www.stereo-club.fr).

Un usage futur pourrait également se développer dans le secteur de la publicité sur des écrans auto-stéréoscopiques.

4.3.3.3 Usages dans les applications professionnelles

Visualisation scientifique

L'usage de la vision stéréoscopique est utile pour la visualisation scientifique dans des domaines variés comme les systèmes d'imagerie spatiale ou d'imagerie géographique pour la cartographie, en chimie et en biologie (visualisation de structures complexes), analyse de données en géosciences (simulation géologique des sous-sols, forages de pétrole, ...), etc.

L'intérêt général réside dans la possibilité d'aider l'utilisateur à analyser et évaluer de grands ensembles de données (avantage N° 2).

CAO, revue de projet et design

Dans les entreprises manufacturières, il n'y a pas d'usage de la 3Ds en CAO mécanique sur les stations de travail. Les bureaux d'études utilisent des solutions en visualisation monoscopique qui leur suffit. Par contre, la 3Ds peut être utilisée pour la revue de projet, pour les études ergonomiques et la validation d'assemblage ou de maintenance des produits (avantages N° 2 et N° 3). Ce dernier avantage permet aux utilisateurs d'interagir avec les applications presque aussi naturellement et intuitivement qu'ils le feraient avec des objets physiques réels. Cela permet d'améliorer le flux de travail des utilisateurs, de réduire les coûts de développement des produits et de permettre aux ingénieurs et concepteurs de représenter leurs idées de manière plus efficace et plus réaliste.

Dans l'architecture et l'urbanisme, on commence à exploiter les visites virtuelles en 3Ds à échelle 1 de bâtiments ou d'infrastructures urbaines pour une meilleure perception des dimensions et des volumes (avantages N°2 et N°3). Cet usage est potentiellement très intéressant mais encore peu employé, vu le lent passage à la modélisation et à la maquette numérique de bâtiments (BIM - *Building Information Modeling*).

Pour le *design*²⁵ d'objets, lors des phases de conception de formes et d'esthétique du produit, la 3Ds peut être employée (avantage N° 2). Pour une meilleure perception des formes et des

²⁵ Le *design* est la création d'un projet en vue de la réalisation et de la production d'un objet ou d'un système, situés à la croisée de l'art, de la technique et de la société.

dimensions, l'affichage stéréoscopique avec contrôle du changement de point de vue, la fonctionnalité N° 4, peut être rajouté, comme dans les bureaux immersifs²⁶.

Marketing

Des études *marketing* de produit peuvent exploiter la vision stéréoscopique, alliant le côté spectaculaire de la vision 3Ds avec la bonne perception du produit étudié (avantages N° 1 et N° 2).

Domaine médical

L'exploitation des moyens de visualisation 3D stéréoscopique en médecine concerne plusieurs domaines et applications. Différentes solutions ont été envisagées mais le déploiement en est encore au stade du balbutiement, en raison des changements à la fois de matériel et de procédures qu'il nécessite. Held et ses collaborateurs [Held *et al.*, 2011] reviennent dans une publication récente sur le potentiel de l'utilisation de la 3Ds pour des applications médicales.

Ainsi, l'un des intérêts majeur est lié au diagnostic en radiologie et ce, afin de permettre une perception distincte des caractéristiques et une reconnaissance immédiate des formes (avantage N°2). Par exemple, en ophtalmologie, la visualisation 3Ds pourrait permettre de faciliter la détection des rétinopathies diabétiques. Egalement, par une reconnaissance plus aisée des formes, la 3Ds contribuerait à la détection de l'anneau neuro-rétinien ou à l'estimation de la pente de la paroi interne du nerf optique, pour ne citer que ces derniers.

La mammographie est perçue comme un domaine où la visualisation 3Ds présente plusieurs avantages pour le diagnostic. En effet, dans une mammographie traditionnelle, il peut y avoir des masquages à cause de la superposition des couches. De plus, le profil 3D des micro-calcifications peut être utilisé comme critère de malignité. Des études ont montré une amélioration significative de la détection des micro-calcifications en utilisant la visualisation stéréoscopique, sans parler du raccourcissement des durées pour établir un diagnostic. Ainsi, la visualisation stéréoscopique permet de percevoir la structure d'une manière correcte et d'analyser l'arborescence d'une manière plus aisée.

La vision stéréoscopique est aussi très intéressante pour la chirurgie endoscopique (avantage N° 2) en exploitant une micro-caméra stéréoscopique. La planification chirurgicale peut être facilitée, surtout sur des organes aux formes complexes comme le cerveau.

Il en est de même en téléchirurgie et dans l'exploitation des techniques de réalité augmentée²⁷ pour des opérations chirurgicales.

Formation

Des applications de formation peuvent exploiter la vision stéréoscopique pour les avantages N° 2 et N° 3 grâce aux techniques de réalité virtuelle. La 3Ds est surtout intéressante pour des apprentissages « sensori-moteurs », telles que des formations aux gestes techniques, par exemple formation au soudage, à la conduite de machines, à la formation des chirurgiens avec des simulateurs de chirurgie par endoscopie. Par contre, pour des formations plus « cognitives », le 3Ds n'est pas forcément nécessaire, par exemple pour la formation à des protocoles de fonctionnement de systèmes ou à des procédures de sécurité.

Téléopération, télérobotique

²⁶ Un bureau immersif est composé d'un périphérique d'interaction et d'un ou de deux écrans 3Ds placés devant l'utilisateur. Il manipule et interagit sur l'objet virtuellement, comme si ce dernier était sur un bureau ou sur une planche à dessin – exemple : le Zspace, <http://zspace.com>.

²⁷ Les techniques de réalité augmentée permettent au chirurgien, équipé d'un visiocasque, de percevoir le corps réel du patient avec en juxtaposition les images virtuelles de l'organe opéré du patient.

L'action à distance par un opérateur exige souvent une perception visuelle performante dans l'environnement proche de l'extrémité du robot télécommandé. La vision stéréoscopique est donc très efficace dans une telle situation (avantage N° 2).

Domaine militaire

Pour les militaires, certains cas cités précédemment sont concernés (visualisation de données, simulateur de formation de maniement d'armes, téléopération de drones) auxquels on peut rajouter la vision stéréoscopique pour les pilotes d'hélicoptère ou d'engins terrestres, *via* un couple de caméras infrarouges lors d'opérations de nuit, la surveillance du territoire, exploitant principalement l'avantage N° 2.

Sans être exhaustif, on peut citer encore des domaines particuliers : *l'archéologie*, pour la reconstitution virtuelle de sites *via* un modèle numérique 3D à l'attention des chercheurs ou du grand public (vulgarisation) ou pour l'assemblage de vestiges d'objets (avantage N° 2).

Les arts numériques exploitent la 3Ds dans certaines œuvres ou événements artistiques pour les avantages N° 1 et N° 3.

4.4 Contraintes perceptives imposées par l'interfaçage 3Ds

Lorsqu'on compare les caractéristiques de la perception 3D humaine à celles de la restitution 3D par des systèmes stéréoscopiques, il apparaît clairement que l'interfaçage 3Ds place le système visuel de l'observateur dans une situation non naturelle. L'interfaçage 3Ds impose donc au système visuel des conditions et contraintes de fonctionnement différentes de celles qu'il rencontre en conditions naturelles. Nous allons maintenant détailler ces contraintes.

4.4.1.1 Conflit accommodation-vergence

En conditions naturelles, lorsque l'observateur fixe un point en profondeur, la distance d'accommodation et la distance de vergence sont les mêmes. Les mécanismes d'accommodation et de vergence opèrent donc conjointement et de manière coordonnée, la synergie entre ces deux mécanismes s'affinant avec le développement du système visuel. En condition d'interfaçage 3Ds, la distance d'accommodation, celle à laquelle le cristallin doit s'adapter pour former une image nette sur le fond de l'œil est toujours celle de l'écran. La distance de vergence, en revanche, dépend de la profondeur à laquelle se trouve l'objet virtuel que l'observateur veut fixer.

Pour voir net l'objet d'intérêt, l'observateur sera donc amené à dissocier l'effort d'accommodation de celui de vergence, allant ainsi à l'encontre de la synergie normalement développée au cours de l'apprentissage visuel et oculomoteur.

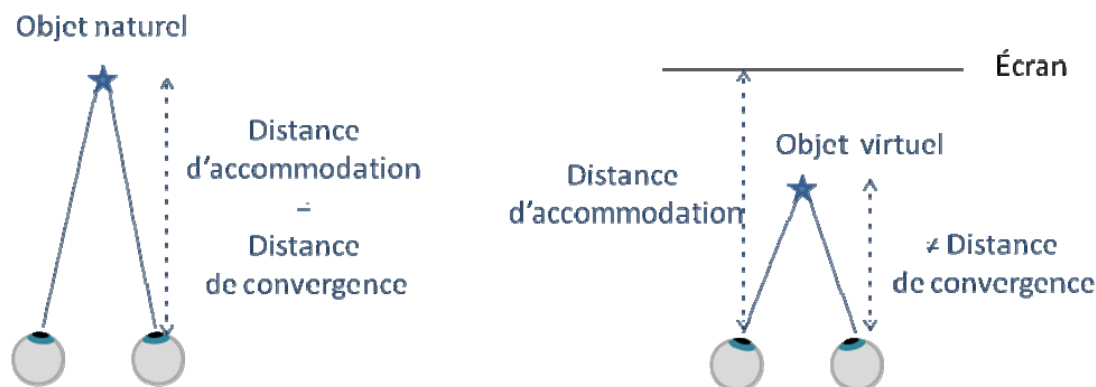


Figure 35 : distances d'accommodation et de vergence en situation naturelle (à gauche) et en situation d'interfaçage 3Ds (à droite)

Contraintes sur la synergie entre vergence et saccades

La présence de disparité binoculaire dans les dispositifs 3Ds stimule le système de vergence qui s'activera en synergie avec les déplacements des yeux par des saccades horizontales ou verticales. Ainsi, lors de la visualisation des dispositifs 3Ds, le système nerveux central contrôle à la fois saccades et vergences comme lors de l'exploration du monde visuel 3D réel. Si l'on admet l'hypothèse des saccades monoculaires rendues inégales pour les deux yeux par la disparité binoculaire (hypothèse de Helmholtz), alors l'exploration du monde virtuel 3Ds ne serait faite que par des saccades codées de façon monoculaires. Or des études des saccades pour chaque œil individuellement n'ont jamais été réalisées pour la 3Ds.

De surcroît, le problème du conflit entre disparité et accommodation, qui peut être une source de fatigue, s'ajoute aux contraintes imposées au mécanisme moteur de la réponse à la disparité (vergence intra-saccadique ou bien saccade monoculaire). Le conflit entre accommodation et disparité est-il mieux toléré lors d'une exploration par des saccades plutôt que par des vergences ? Ce sont des questions encore inexplorées. Seules des études explorant ces questions pourront apporter une base objective pour l'évaluation des effets potentiels de la 3Ds.

4.4.1.2 Incohérence visuo-vestibulaire

La position de l'homme dans l'espace, son équilibre dynamique et sa posture statique, sont contrôlés par un système complexe qui est fondé sur de multiples sources d'information : somatosensorielle, proprioceptive, vestibulaire, visuelle, et oculomotrice. L'avantage d'une telle multiplicité est la possibilité de compenser une source par une autre dans le cas d'un déficit, mais cette multiplicité rend la compréhension de son environnement difficile.

Les liens entre l'équilibre dynamique postural et l'oculomotricité sont bien connus. Des exemples classiques sont la fonction vestibulo-oculaire (rotatoire ou linéaire) et la fonction optocinétique impliqués dans l'équilibre postural. Les canaux semi-circulaires et les otolithes dans l'oreille interne détectent le mouvement de la tête et du corps, déclenchant des mouvements oculaires « compensatoires » ayant pour but de stabiliser l'image sur la rétine durant ce mouvement du corps dans l'espace. D'autre part, les informations visuelles telles que le glissement des images sur la rétine entraîné par le mouvement du corps mobilisent également des mouvements oculaires (optocinétique) qui, en symbiose avec la fonction vestibulaire, servent à stabiliser les images sur la rétine. Les déficits de ces fonctions vestibulaires et optocinétiques entraînent des sensations de vertige, des troubles d'équilibre et de la posture.

Des études récentes suggèrent un lien entre vision, oculomotricité et équilibre postural. La vergence pourrait être perçue comme un « calibreur » des autres sous-systèmes oculomoteurs, y compris des systèmes de la fonction vestibulaire. En effet, les dernières décennies de recherches en physiologie ont montré que le gain de la fonction vestibulo-oculaire s'ajuste selon la distance de fixation du sujet et donc de l'angle de la vergence : le gain des réflexes vestibulo-oculaires (à savoir, l'amplitude du mouvement oculaire compensatoire par rapport au mouvement de la tête ou du corps) augmente en vision proche. Si la vergence fonctionne mal, le réflexe vestibulo-oculaire sera inapproprié, voire insuffisant. Le résultat d'une compensation vestibulo-oculaire insuffisante ou exagérée pourrait être un mouvement résiduel des images sur la rétine, engendrant une instabilité posturale, voire une perte d'équilibre (voir l'ouvrage de synthèse de Leigh et Zee [Leigh et Zee, 1999]. Rappelons ici les expériences classiques citées dans l'ouvrage de Brandt [Brandt, 1999].

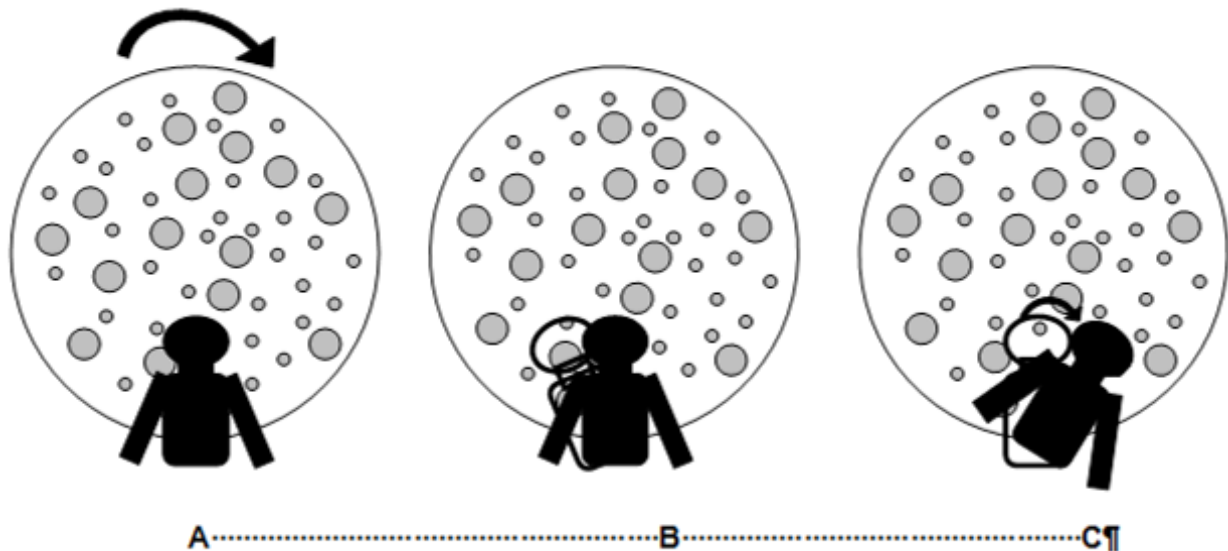


Figure 36 : expérience de déséquilibre lié à la vision d'une image en rotation

Dans la Figure 36, partie A), le sujet est debout, devant une grande surface circulaire que l'on peut tourner (par exemple à droite) déclenchant un mouvement visuel et engendrant ainsi, en B), une sensation de déséquilibre du corps du sujet, dans le sens opposé (c'est à dire à gauche). En C), le sujet effectue un déplacement de son corps en vue de compenser cette sensation de déséquilibre, c'est-à-dire dans le sens du mouvement visuel.

Chez l'homme, la régulation de la vergence au cours de la vie change ; elle est fragile, idiosyncrasique et variable. On observe fréquemment des troubles pseudo-vestibulaires : des pertes d'équilibre, vertiges et céphalées qui peuvent être liés aux problèmes de la vergence.

Des études récentes ont permis d'objectiver des anomalies (lenteur dans le déclenchement et la trajectoire du mouvement de vergence) chez à peu près 10 % des enfants qui se plaignent de vertiges et chez qui le médecin ORL (oto-rhino-laryngologiste) ne met pas en évidence de pathologies vestibulaires. Des troubles d'équilibre et du contrôle postural ont été également mis en évidence, ce qui souligne la synergie entre la vergence, l'oculomotricité, l'équilibre et la posture ([Kapoula *et al.*, 2013],[Bucci *et al.*, 2011], [Anoh-Tanon *et al.*, 2000]).

En situation de conflit accommodation-vergence (cas des technologies 3Ds), les signaux internes régulant la fonction vestibulaire peuvent être faussés et créer une incohérence supplémentaire. Ces conflits spécifiques doivent être distingués de l'incohérence visuo-vestibulaire classiquement observée dans le mal du simulateur, même en absence de stimulation stéréoscopique.

4.4.1.3 Incohérence de disparité verticale

En situation naturelle, un objet qui n'est pas à égale distance des deux yeux produit une image de taille différente sur chaque œil, induisant de la disparité verticale. Pour préserver ce phénomène en situation d'interfaçage, il faudrait pouvoir adapter la taille des images projetées sur chaque œil en fonction de la position de la direction du regard de l'observateur. Toute autre situation amènera une incohérence entre la disparité verticale attendue et la disparité verticale effective. La Figure 37 présente la disparité verticale. À gauche, la disparité verticale des images rétiniennes est observée en situation naturelle, lorsque l'objet est à distance différente des deux yeux. À droite, les images qui devraient être affichées pour chaque observateur afin de mimer la disparité verticale naturelle sont représentées. Ces images dépendent de la position de l'observateur et sont incompatibles entre différents observateurs.

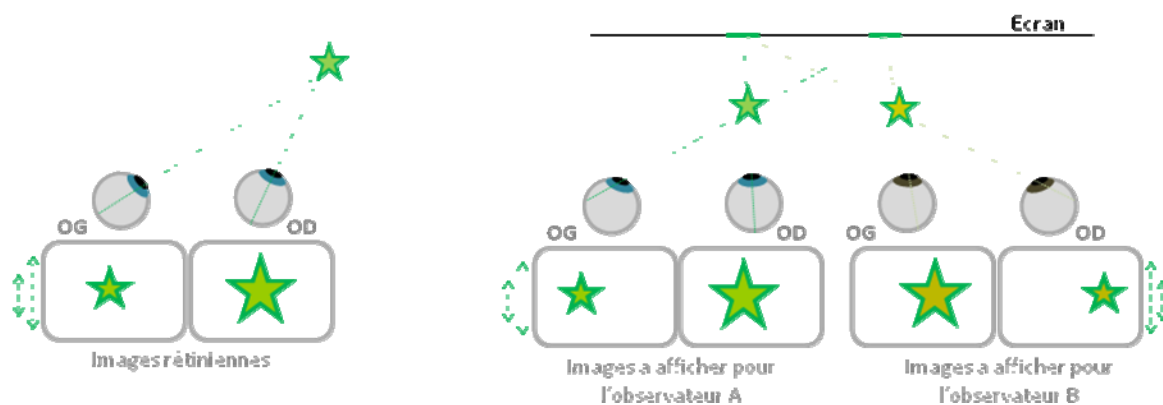


Figure 37 : disparité verticale

4.4.1.4 Incohérence entre indices de profondeur (conflits d'indices monoculaires et binoculaires)

Si la distance de l'observateur à l'écran n'est pas prise en compte dans la conception ou la restitution de contenu 3D, le système visuel va rencontrer des difficultés supplémentaires. Les disparités artificiellement recrées sont en effet adaptées à une distance théorique de l'observateur. Si celle-ci est sous-estimée ou surestimée, les distances perçues seront écrasées ou au contraire dilatées (cf. Figure 38), pouvant mener à des incohérences entre la distance perçue *via* la vergence et les distances perçues *via* d'autres indices (taille relative ou parallaxe de mouvement par exemple).

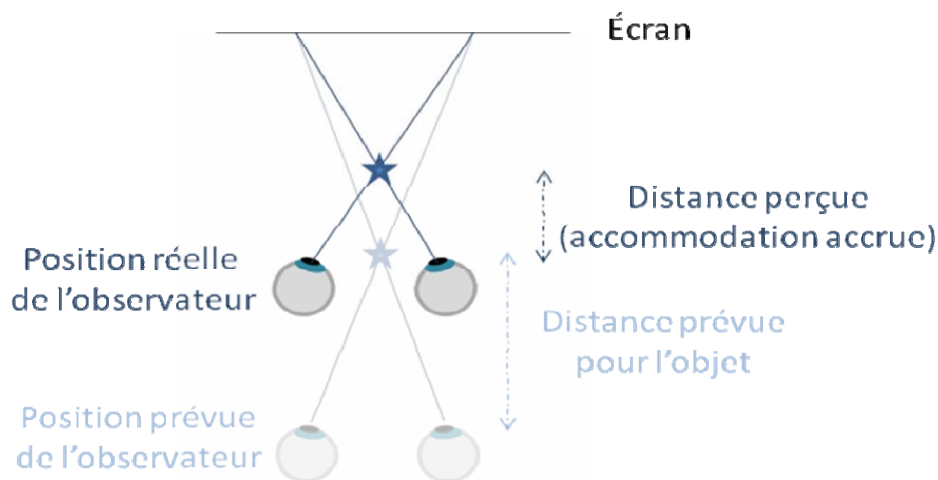


Figure 38 : effet de la distance de l'observateur à l'écran sur le relief perçu

Dans notre environnement quotidien, le cerveau combine les informations issues des différents indices de profondeur présentés précédemment afin d'optimiser sa perception en relief, et d'accéder à une estimation « absolue » des tailles et des distances. Les indices de profondeurs ont en effet une contribution plus ou moins importante dans la perception générale du relief, selon la distance de l'observateur à la scène perçue [Cutting & Vishton, 1995].

La Figure 39 présente les contrastes de profondeur selon la distance de visualisation pour différents indices de profondeurs. L'information d'occultation (dit recouvrement dans le schéma) est prépondérante sur tous les autres indices et n'est approchée que par la disparité binoculaire. La sensibilité à la profondeur fournie par la disparité binoculaire diminue avec la distance, mais reste un élément majeur dans la perception du relief pour des distances de visualisation de moins de 10 m. Un autre élément important, jusqu'à une distance de 10 m, est la parallaxe du

mouvement (appelée perspective de mouvement dans le schéma). L'accommodation ou la vergence ne contribuent que légèrement à la perception des profondeurs et principalement pour des distances inférieures au mètre.

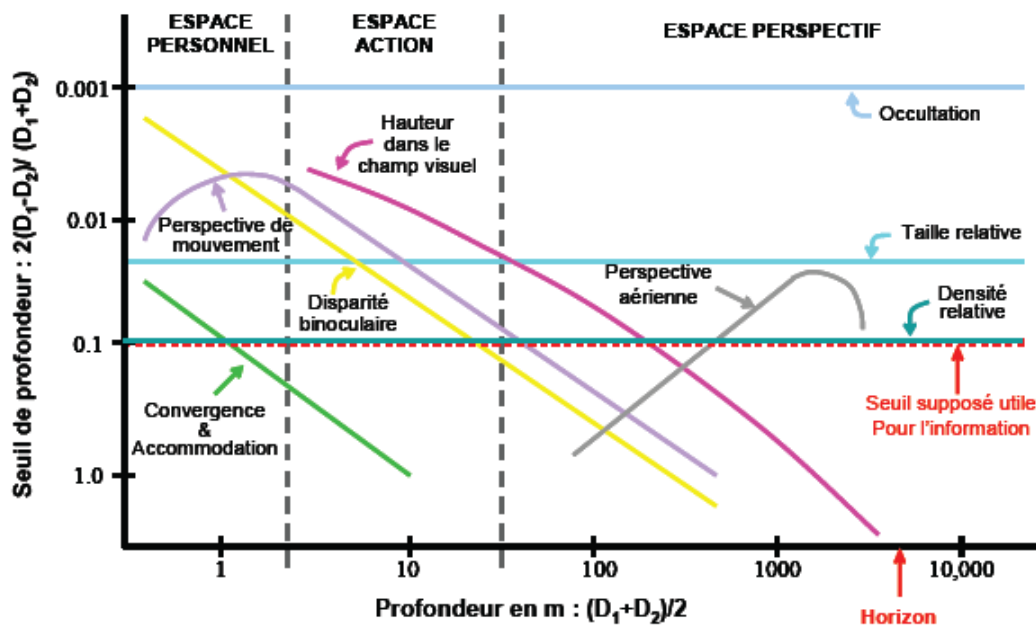


Figure 39 : représentation schématique de l'efficacité des neuf indices principaux de perception de la profondeur en fonction de la distance par rapport à l'observateur ([Cutting et Vishton, 1995])

Un autre élément qui pourrait contribuer à introduire des conflits entre indices de profondeur est la distance interpupillaire. Il s'agit en effet d'une caractéristique importante qui diffère entre les individus et dont dépend la disparité binoculaire. Des recherches approfondies sur la distance interpupillaire chez des personnes de sexe, d'ethnies et d'âge différents ont montré que la distance interpupillaire des adultes se situe entre 50 et 70 mm, avec une moyenne de 63 mm. En prenant en compte les cas extrêmes et les enfants, on peut considérer que la distance interpupillaire se situe dans un intervalle allant de 40 à 80 mm [Dodgson, 2004].

À disparité présentée égale, les personnes ayant une plus petite distance interpupillaire devraient percevoir plus de profondeur que celles possédant une distance interpupillaire plus grande (même effet que lorsque l'on accroît la distance entre caméras à distance interpupillaire fixe). Le conflit entre les distances perçues *via* les différents indices est donc susceptible de varier selon les populations (enfant et adultes).

4.4.1.5 Diamètre pupillaire

Au niveau individuel, une diminution de luminosité élargit le diamètre pupillaire, ce qui induit une diminution de la qualité de l'image par augmentation des aberrations [Howard, 2002] et réduit la profondeur de champ, nécessitant alors une accommodation plus fine pour conserver la netteté sur le point fixé.

Au niveau de la population, on observe également des différences de diamètre pupillaire entre individus. Outre le niveau de luminosité et l'activité mentale, le diamètre pupillaire dépend en effet de l'âge et du sexe [Secular et Blake, 2002]. De telles différences pourraient également affecter la stéréoscopie, et déterminer des populations plus ou moins sensibles aux conflits accommodation-vergence.

Les spécialistes de contenus 3Ds augmentent artificiellement la profondeur de champ, rendant toute l'image nette quelle que soit sa profondeur de façon à rendre possible l'exploration de

l'espace 3D par l'observateur sans rencontrer de zone de flou (hors focus caméra). Cette approche va à l'encontre de la perception naturelle dans laquelle les objets situés à distance en profondeur de l'objet fixé (derrière ou devant) sont flous et ne viennent donc pas interférer directement avec la perception de l'objet fixé.

4.5 Contraintes perceptives imposées non spécifiques à la 3Ds

Le vertige peut apparaître quand on est immergé dans un environnement virtuel (ou réel et filmé). Une des causes qui n'est pas due aux images stéréoscopiques, et peut donc survenir avec des images monoscopiques, est souvent dénommée « le mal du simulateur ». Un exemple classique est la navigation dans un environnement artificiel, que ce soit ou non la représentation d'une voie de transport (route, voies ferrées, etc.). Des effets néfastes surviennent surtout si les mouvements de rotation sont importants et à grande vitesse ou s'il y a des accélérations et des décélérations brutales. La personne observe son déplacement virtuel, représenté visuellement par le défilement des images sur les écrans. Mais son corps est en général immobile devant le dispositif d'affichage²⁸. La vision étant notre sens prépondérant, l'observateur a l'impression d'un déplacement, grâce au phénomène devection, bien que ses deux systèmes vestibulaires indiquent à son cerveau que son corps est figé devant les écrans.

Si le dispositif d'affichage ne couvre qu'une petite partie du champ visuel de la personne, celle-ci perçoit inconsciemment, en vision périphérique, l'espace réel immobile autour de l'écran, ce qui la stabilise. La personne a la sensation de voir « à distance » un déplacement dans une scène et ne ressent pas d'incohérence sensori-motrice et donc de vertige ou de nausée.

En revanche, si le dispositif d'affichage est très grand et recouvre une grande partie ou tout le champ visuel de l'observateur, ce dernier n'a plus de repère visuel immobile en vision périphérique. Son cerveau reçoit alors des *stimuli* sensoriels trop incohérents entre le phénomène devection et le non déplacement de son corps indiqué par ses deux systèmes vestibulaires. La personne se sent corporellement immergée dans l'environnement affiché. Le risque de malaise est grand et le « mal du simulateur » peut survenir, à savoir des vertiges, nausées, etc. suivant les types de mouvements imposés.

Ce phénomène est physiquement l'inverse du mal de mer, où nos systèmes vestibulaires et nos jambes détectent les mouvements de roulis et de tangage du bateau, tandis que nous voyons l'environnement immobile à l'intérieur de la cabine du navire.

Le premier cas, « voir à distance un déplacement », se rencontre quand on est devant un écran classique d'ordinateur ou devant un téléviseur. À l'opposé, le deuxième cas, « corporellement immergé dans l'environnement affiché », se rencontre quand on est dans une salle immersive ou devant un grand écran semi-sphérique du type géode. Dans ce cas, les concepteurs des images ne doivent pas trop faire de navigation avec grands mouvements de rotation et(ou) d'accélération brutale afin d'éviter le mal du simulateur.

²⁸ Le corps de l'observateur peut être aussi en mouvement devant le dispositif d'affichage, si on place l'observateur sur une plate-forme mobile à 6 degrés de liberté, comme dans les simulateurs de transports (simulateurs de vol, de voiture, etc.). Ces dispositifs sont en général d'usages professionnels.

5 Règles de conception de contenu pour le confort visuel

Les règles présentées ci-dessous permettent de mettre en évidence les liens entre la conception de contenu 3Ds et la disparité rétinienne imposée à l'observateur. Ces règles d'usage utilisées par les professionnels en 3Ds pour améliorer le confort visuel de contenu 3Ds n'ont pas été discutées et validées par le groupe de travail, elles ne doivent donc pas être interprétées comme des recommandations formulées par l'Anses.

5.1 Principe de conception des images stéréoscopiques

Que ce soient des images réelles, provenant de caméras, ou que ce soient des images de synthèse, provenant de logiciels, le principe des images en relief est le même pour mieux percevoir en trois dimensions : exploiter la capacité de fusion binoculaire de l'observateur. Pour cela, il s'agit de créer sur le plan d'un écran deux images, chacune correspondant à chaque œil, ceux-ci ne voyant qu'une image grâce à un dispositif technique décrit précédemment. À un point « immatériel », qui sera perçu dans l'espace tridimensionnel devant ou derrière l'écran, correspondent deux points réels homologues (mêmes caractéristiques colorimétriques) sur le plan de l'écran. Les points homologues de chaque couple stéréoscopique doivent être décalés géométriquement sur l'écran pour fournir des disparités rétinienne à l'observateur. Pour que son système visuel puisse aisément fusionner les points homologues, ils doivent être décalés dans le plan transversal de l'observateur, en général le plan horizontal²⁹. La distance entre ces deux points homologues est appelée parallaxe absolue sur l'écran. En fonction de la distance de l'observateur à l'écran, la parallaxe angulaire détectée par l'observateur sera variable. La parallaxe angulaire horizontale produit la disparité rétinienne qui fournit l'effet stéréoscopique de profondeur, chaque œil percevant une image similaire, mais non identique, à celle d'une vision spatiale réelle. Les images observées par les yeux ne sont que des images planes obtenues par projection géométrique de solides dans l'espace. Ces projections planes induisent des contraintes géométriques et perceptives. Les différents types de parallaxe sont exposés ci-dessous.

5.1.1 Parallaxe positive (non croisée)

Quand l'objet observé est perçu virtuellement derrière l'écran, la parallaxe est positive. Les points homologues gauche et droit sont respectivement affichés à gauche et à droite (Figure 40).

²⁹ Si l'observateur a la tête traquée (en réalité virtuelle, avec un visiocasque, etc.), le plan transversal n'est pas toujours horizontal. Par simplicité, nous employons toutefois le terme de parallaxe horizontale (et aussi perpendiculairement de parallaxe verticale).

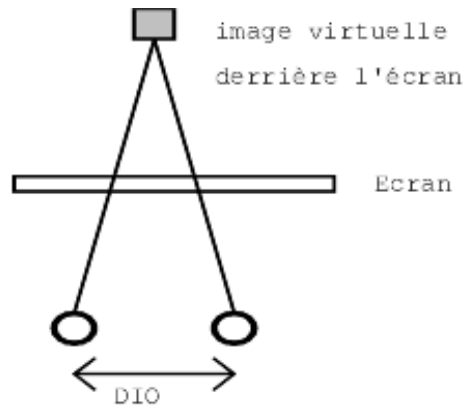


Figure 40 : parallaxe positive permettant de visualiser des objets derrière l'écran ; distance interpupillaire = distance intra oculaire (65 mm en moyenne)

5.1.2 Parallaxe nulle

Quand la partie d'un objet virtuel est perçue au niveau de l'écran, les points homologues ont une parallaxe nulle. Ils sont affichés aux mêmes endroits (Figure 41).

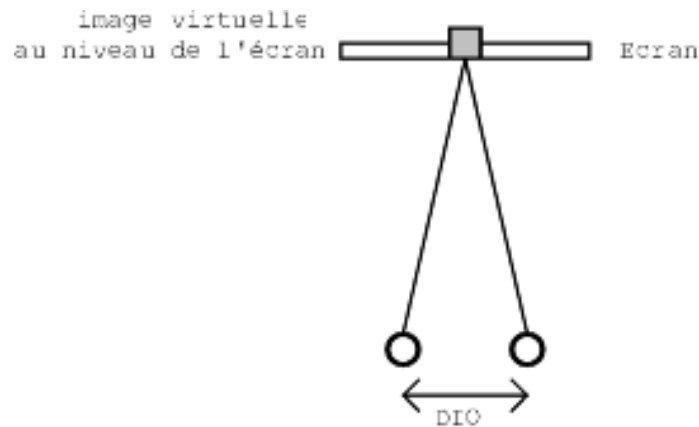


Figure 41 : parallaxe nulle, les points homologues sont au même endroit

5.1.3 Parallaxe négative (croisée)

Quand l'objet observé est perçu virtuellement devant l'écran, la parallaxe est négative. Les points homologues gauche et droit sont respectivement affichés à droite et à gauche (Figure 42).

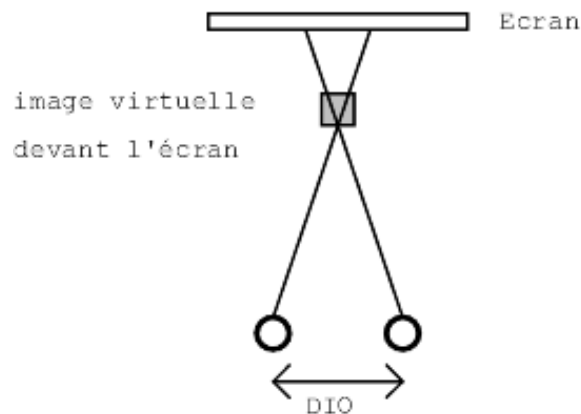


Figure 42 : parallaxe négative permettant de visualiser des objets devant l'écran

La parallaxe angulaire horizontale doit être petite pour permettre aisément de fusionner les deux

images (stéréopsie) sans fatigue oculaire. L'objectif est donc de créer des images stéréoscopiques avec faible parallaxe angulaire horizontale tout en gardant un effet de profondeur.

Les disparités rétiniennes fournies à l'observateur dépendent des parallaxes angulaires horizontales. Comme les images stéréoscopiques créent des parallaxes absolues sur l'écran, la position de l'observateur à l'écran intervient sur les valeurs des disparités rétiniennes. Il y a plusieurs cas à envisager :

- la position de la tête de l'observateur est fixe et connue (parfaitement connue dans un visiocasque, estimée pour une personne assise devant un écran 3Ds d'ordinateur, imposée par la technologie des écrans auto-stéréoscopiques) ;
- la position de la tête de l'observateur est connue en permanence (tête traquée, exploitée en Réalité Virtuelle, dans de futurs téléviseurs 3Ds) ;
- La position des têtes des observateurs est variable sur une zone d'observation connue approximativement (salle de cinéma 3Ds, téléviseurs 3Ds).

Dans ce dernier cas, en général, les règles stéréoscopiques devront tenir compte d'une position moyenne de l'observateur face à l'écran, tout en prenant en compte que les disparités rétiniennes sont maximales pour les observateurs les plus proches de l'écran.

Un problème survient avec les images stéréoscopiques quand elles ne sont pas modifiées lors du mouvement de l'observateur par rapport à l'écran. Si ce dernier se translate parallèlement à l'écran, il voit les objets se déplacer anormalement : il perçoit des mouvements parasites, appelés pseudoscopiques (Figure 43).

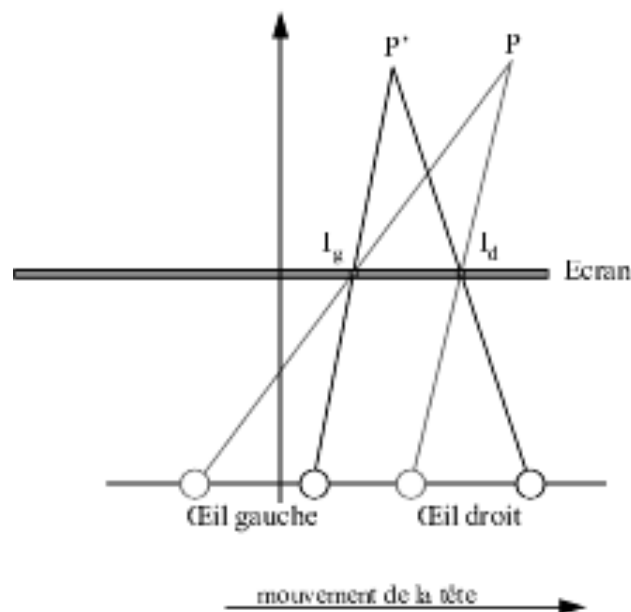


Figure 43 : mouvements pseudoscopiques quand l'observateur bouge la tête non traquée

Les yeux de l'observateur se translatant vers la droite, il voit le point P se déplacer vers la gauche au point P', car les points I_d et I_g sont fixes. Ce phénomène n'est pas toujours perceptible, car l'observateur est souvent assis, ce qui implique une translation latérale de la tête trop faible pour entrevoir ces faux mouvements. Les observateurs décalés latéralement par rapport à l'écran percevront un environnement tridimensionnel plus ou moins déformé. Ce phénomène n'est pas toujours perceptible.

Un schéma similaire permet de comprendre que si l'observateur recule ou avance face à l'écran, il y a étirement ou raccourcissement de la profondeur perçue (Figure 44).

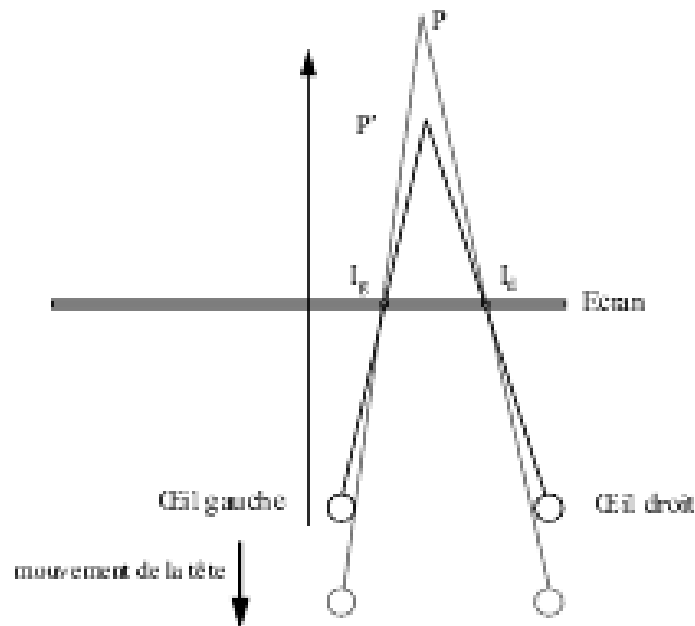


Figure 44 : la profondeur perçue dépend de la position de l'observateur par rapport à l'écran

Ce phénomène implique aussi qu'il n'y a théoriquement qu'une seule distance à l'écran (la distance orthostéréoscopique) susceptible de ne pas déformer les objets en profondeur, perçue avec les indices monoculaires et binoculaires qui doivent avoir la même échelle dans le sens de la profondeur. Le cerveau tolère en pratique une certaine marge de déformation entre la dimension en profondeur et les deux dimensions parallèles à l'écran. En conclusion, l'affichage est théoriquement prévu pour un seul observateur à une position bien déterminée. À l'inverse, comme les vues aériennes en relief, les indices monoculaires et binoculaires ne se correspondent pas et les objets, tels que les bâtiments, sont vus en miniature (l'effet « maquette »).

Sur quels critères doit-on se baser pour positionner les deux caméras fictives ou réelles ? *A priori*, on peut penser que l'on doit faire converger les deux axes optiques vers la zone principale à observer (Figure 45). Dans ce cas, les projections sur les deux plans donnent des images avec des parallaxes horizontales et verticales. Par exemple, les projections droite et gauche de la face avant d'un cube centré sur l'axe Zr donnent les images suivantes sur la Figure 46, mais ce cas des caméras à axes optiques convergents n'est guère souhaitable, car il impose des parallaxes verticales qui rendent difficile la fusion des images.

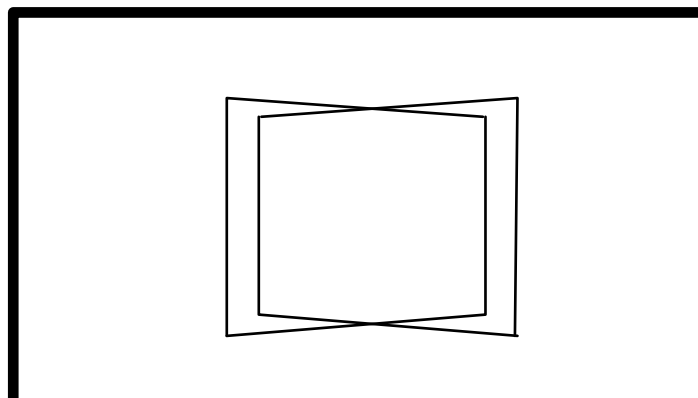


Figure 45 : zone d'observation

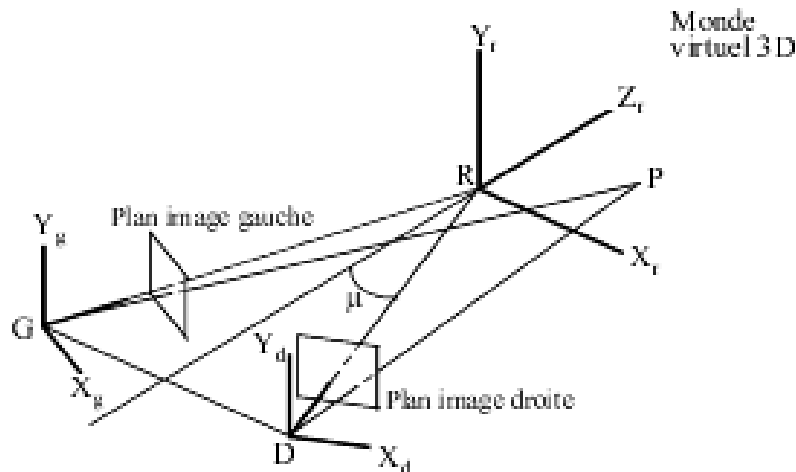


Figure 46 : projections de la face avant d'un cube

L'observateur n'ayant pas les yeux traqués, il n'est pas possible de connaître dans quelle zone de l'écran il dirige son regard. Il faut donc éviter de créer des parallaxes verticales sur le couple d'images stéréoscopiques, même si en vision naturelle il y a des disparités rétiniennees verticales dans le champ de vision périphérique. Des études ont montré qu'il est difficile de fusionner pour des parallaxes angulaires verticales d'angle supérieur à 20' d'arc [Julesz, 1971], [MacAllister *et al.*, 1990], [Baker, 1987], [Speranza, 2002] et [Allison, 2007].

Il est donc souhaitable que les deux axes optiques des caméras soient parallèles pour éviter les parallaxes verticales sur l'écran qui procurent des gênes à l'affichage. Pour la création des images de synthèse, cette condition est aisée à respecter parfaitement : les deux points de vue de création des images seront parallèles et un décalage horizontal du couple des images stéréoscopiques sera programmé pour générer des parallaxes horizontales adéquates. Pour réaliser ce décalage sans perte d'image sur les bords latéraux de l'écran, les plans de projection seront asymétriques. La distance entre les deux axes des caméras virtuelles peut être imposée à la distance interpupillaire de l'observateur, en général dans l'objectif d'obtenir une vision orthostéréoscopique. La distance interpupillaire est soit approximée à 65 mm, soit mesurée pour un observateur donné, permettant d'adapter les paramètres stéréoscopiques. Si la distance entre les caméras n'est pas la distance interpupillaire, on n'est pas en vision orthostéréoscopique et la perception binoculaire de la profondeur existe en créant une déformation de l'espace en profondeur non naturelle (incohérence entre la profondeur due aux perspectives et la profondeur binoculaire), pas forcément perceptible.

Dans le cas où on filme avec des caméras réelles, il est plus difficile d'éviter des parallaxes verticales, soit dues à la position des caméras ayant des axes optiques convergents, soit dues aux imperfections optiques des caméras à axes optiques parallèles (dans ce cas, il y a perte des bords des images lors du décalage entre les images droites et gauches). Par post-traitement sur chaque couple d'images, les parallaxes verticales sont supprimées pour faciliter la fusion binoculaire.

Des considérations psychophysiques impliquent un problème secondaire. Un écran d'ordinateur ou de télévision est perçu par le cerveau comme une fenêtre, limitée par les bords de l'écran. Ceux-ci peuvent être source de confusion. Des objets affichés en parallaxe négative, donc perçus devant l'écran et partiellement occultés par les bords de l'écran créent un conflit dans leur localisation. Ce phénomène peut empêcher la fusion des images et perturbe l'observateur. Il faut en déduire qu'il est rarement souhaitable de créer des objets « sortant de l'écran » malgré le côté attrayant que cela procure quand les écrans sont de petite taille. Ce procédé est plus aisé à employer avec les très larges écrans des salles de cinéma en relief.

5.2 Choix des paramètres stéréoscopiques

5.2.1 Introduction

Il existe différentes formules pour le réglage d'un couple d'images stéréoscopiques. Quel que soit l'usage de ce type d'images, il faut limiter le décalage horizontal entre les deux images droite et gauche pour limiter l'incohérence vergence / accommodation et permettre la fusion des deux images par le système oculaire de l'observateur. Concrètement, il s'agit de limiter la disparité rétinienne pour le système oculaire. Mais cette mesure d'optométrie n'est pas employée directement par les concepteurs des images stéréoscopiques. Pour ces derniers, il n'est pas possible d'exprimer le décalage horizontal sur l'écran en disparité rétinienne. Cette dernière dépend de la distance interpupillaire de l'observateur et de sa distance à l'écran, qui sont actuellement rarement mesurées et souvent estimées approximativement.

Il y a deux cas principaux :

- on suppose connue la distance d'observation à l'écran (soit mesurée par *tracking* de la tête de l'observateur, soit estimée assez correctement : écran auto-stéréoscopique, télévision 3Ds, etc.). On peut alors exprimer le décalage horizontal en parallaxe horizontale angulaire P_{na} , c'est l'angle DPG entre deux points homologues D et G du couple d'images, vu par l'observateur (point P : milieu entre les deux centres optiques des yeux, cf. Figure 47) ;

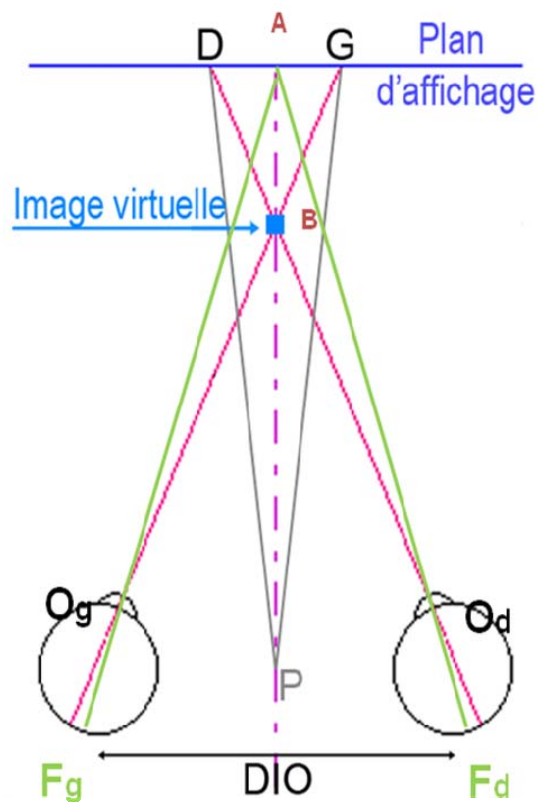


Figure 47 : parallaxe horizontale angulaire, angle DPG

- on suppose inconnue la distance précise d'observation à l'écran. Dans ce cas, on exprime le décalage horizontal en parallaxe horizontale absolue (P_n), en mètre ou en pixels. La relation entre le décalage horizontal des images et la disparité rétinienne n'est qu'approximative, elle est déterminée par la distance moyenne de l'ensemble des spectateurs (salle de cinéma) ou la distance la plus courte.

Un autre cas, plus rarement utilisé actuellement, consiste à mesurer la distance interpupillaire de l'observateur en plus de sa distance à l'écran, par un dispositif de « tracking » de sa tête. Cette méthode est employée sur certaines applications en réalité virtuelle, surtout si l'on souhaite une perception précise et peu biaisée des formes et des dimensions de la scène observée. La distance interpupillaire varie d'une façon non négligeable. À titre d'exemple, dans une entreprise exploitant la vision stéréoscopique, les mesures de distance interpupillaire de 165 observateurs d'images stéréoscopiques variaient de 55,0 à 76,0 mm (moyenne = 64,8 mm, écart-type = 3,5 mm), pour les hommes (147) de 56,5 à 76,0 (moyenne = 65,2 mm, écart-type = 1,1 mm) et pour les femmes (18) de 55,0 à 66,0 mm (moyenne = 61,4 mm, écart-type = 1,4 mm).

5.2.2 Relation entre parallaxe horizontale angulaire et disparité rétinienne :

Définition de la disparité rétinienne :

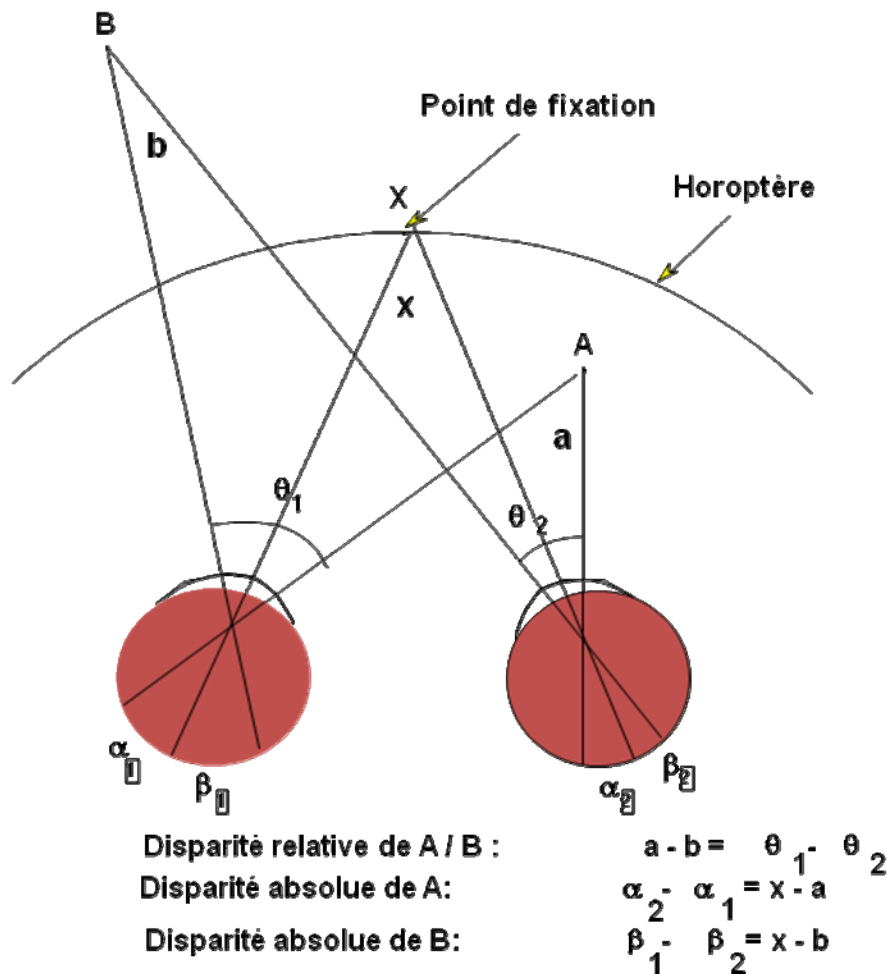


Figure 48 : illustration de la disparité rétinienne

Remarque : pour la disparité de A, en avant de l'horoptère, les angles sont de signes différents

Détermination de la relation entre parallaxe horizontale angulaire et disparité rétinienne :

Parallaxe horizontale angulaire (P_{ha}) = angle DPG.

Disparité absolue du point B = angle $G0_gA$ – angle DO_dA .

Les angles $A0_gD$ et APD sont presque identiques, compte tenu du rapport important entre la distance interpupillaire et la distance à l'écran. P_{ha} est donc égal approximativement à la disparité rétinienne de B.

5.2.3 Formules pour le réglage d'un couple d'images stéréoscopiques

Différentes formules sont employées par les concepteurs d'images stéréoscopiques, suivant les connaissances ou non de la distance interpupillaire (distance interpupillaire) de l'observateur et de sa distance à l'écran.

- certains parlent en parallaxe angulaire horizontale ;
- d'autres en distance de parallaxe horizontale sur l'écran (en cm, en pixel, en % de la largeur de l'écran), sans se soucier de la distance de l'observateur à l'écran ;
- d'autres en % de la base en photographie ;
- d'autres en dioptrie.

5.2.4 Formule employée en photographie :

D'après le livre de Brewster (1856), la formule est :

« La base ne doit pas dépasser le trentième de la distance du premier plan » : la « règle du trentième ». Cette règle s'énonce ainsi : choisissez une « base » (distance entre les deux points de vue) égale au trentième de la distance du premier plan, ou arrangez-vous pour que le premier plan photographié soit à une distance égale à trente fois la base. Ce qui implique que la parallaxe horizontale angulaire soit limitée à $1,9^\circ$ ($2 \times \arctg(0,5/30)$), [Cahen, 2011].

5.2.5 Formule employée en Réalité Virtuelle et infographie :

La parallaxe horizontale angulaire doit être inférieure à $1,2^\circ$ à $1,5^\circ$, ce qui peut être aisément contrôlé si l'observateur a la tête localisée grâce à un dispositif de « tracking » de tête [Fuchs *et al.*, 2006].

Suite à des études expérimentales [Valyus, 1962], on a démontré la difficulté à fusionner deux images planes ayant un angle de parallaxe supérieur à 1,5 degrés : le paramètre limitatif est l'angle de parallaxe (angle de vision pour deux points homologues) et non la distance de parallaxe. Les études entreprises par l'équipe RV&RA de Mines ParisTech dans le cadre de la téléopération avec des images réelles indiquent une limite d'angle de parallaxe de $1,2^\circ$ [Fuchs *et al.*, 1995].

L'étude de Yei-Yu Yeh [Yeh *et al.*, 1990] examine la limite de la fusion et l'appréciation de la profondeur. La limite de fusion est analysée en fonction de différents paramètres des *stimuli* affichés sur un écran cathodique avec lunettes actives : la couleur, le temps d'affichage, la position verticale sur l'écran et la parallaxe positive ou négative. Les résultats impliquent que la limite de fusion (donnée en angle de parallaxe) est très faible pour un *stimulus* bref de 0,2 seconde : soit 27 minutes d'arc (parallaxe négative), soit 24 minutes d'arc (parallaxe positive) comparativement à un *stimulus* de 2 secondes : 1,5 degrés en parallaxe > 0 . Il est donc plus difficile d'observer en relief des images en mouvement rapide.

Les études entreprises à l'Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA, anciennement CERMA - Centre d'études et de recherche de médecine aérospatiale) du ministère de la Défense donnent des résultats corroborant les précédents, en étant plus précis. La limite de fusion est aussi

fonction de la fréquence spatiale des images, ce qui n'est pas étudié dans les travaux cités précédemment. Leurs études permettent de conclure que de plus grandes disparités horizontales sont fusionnables lorsque les stimulations visuelles sont constituées de basses fréquences spatiales. Ils ont mis en évidence deux mécanismes impliqués dans la fusion selon le temps du *stimulus* : une fusion immédiate si la disparité n'est pas trop grande et une fusion non immédiate pour des disparités plus grandes, mettant en jeu des mouvements de vergence réflexes des yeux. Les résultats donnent entre autres : à la fréquence spatiale de 4,8 cycles / degré une fusion immédiate jusqu'à 20' d'arc et une fusion maximale à 52' d'arc environ. À la fréquence spatiale de 0,22 cycles / degré une fusion immédiate jusqu'à 80' d'arc et une fusion maximale à 176' d'arc environ [Perrin *et al.*, 1998].

5.2.6 Formule employée au cinéma :

Alain Derobe a réalisé un tableau établissant la moyenne du calibrage des lointains observés sur diverses largeurs d'écran (donc imposant la limite de disparité rétinienne), publié en 2009 par la CST. Ils imposent donc la limite de parallaxe horizontale absolue. Elle est donnée en pourcentage de décalage sur l'écran, ou en centimètres ou en nombre de pixels de l'image 2K.

Tableau 5 : mesure des décalages des lointains pour différentes largeurs d'écran, source Alain Derobe – CST, Janvier 2009

Largeur d'écran (base)	Pourcentage de décalage	Mesure du décalage des lointains	Correspondance en pixels
Ecran de 26 m	1/4 %	De 6,5 à 10 cm sur l'écran	5/7 pixels 2K ou HD
Ecran de 19,5 m	1/3 %	De 6,5 à 9 cm sur l'écran	7/8 pixels 2K ou HD
Ecran de 13 m	1/2 %	De 6,5 à 8 cm sur l'écran	10/12 pixels 2K HD
Ecran de 9,85 m	2/3 %	De 6,5 à 7 cm sur l'écran	15/16 pixels 2K HD
Ecran de 6,5 m	1 %	6,5 mesuré sur l'écran	20 pixels 2K ou HD
Ecran de 5 m	1,1 %	De 5,6 à 6 cm sur l'écran	22 pixels 2K ou HD
Ecran de 4 m	1,3 %	De 5 à 5,5 cm sur l'écran	27 pixels 2K ou HD
Ecran de 3 m	1,6 %	De 4,8 à 5,3 cm sur l'écran	32 pixels 2K ou HD
Ecran de 2 m	2 %	De 4,8 à 5,3 cm sur l'écran	40 pixels 2K ou HD
Ecran de 1,5 m	2,25 %	De 4 à 4,5 cm sur l'écran	45 pixels 2K ou HD
Ecran de 1 m	2,3 %	De 3,4 à 4 cm sur l'écran	50 pixels 2K ou HD
Ecran de 65 cm	2,5 %	De 2,5 à 3 cm sur l'écran	45 pixels 2K ou HD
Ecran de 50 cm	2,2 %	De 1,5 à 3 cm sur l'écran	42 pixels 2K ou HD
Ecran de 30 cm	2,25 %	De 1 à 1,3 cm sur l'écran	40 pixels 2K ou HD
Ecran de 26 cm	2,3 %	6 mm sur l'écran	40 pixels 2K ou HD
Ecran de 26 cm	2,3 %	5 mm sur l'écran	46 pixels 2K ou HD
Ecran de 13 cm	2,5 %	3 mm sur l'écran	50 pixels 2K ou HD

Sauf pour les petits écrans, le tableau est basé sur le point de vue d'un spectateur moyen qui se place à une distance égale à la largeur de l'écran pour voir un champ « normal ». Une véritable proportionnalité entre le décalage des lointains et la taille d'écran n'est rigoureuse que pour un

écran d'une base d'environ 6,5 mètres. Avec les écrans plus grands, on pourra tolérer un décalage des lointains un peu supérieur, ce qui n'entraînera une divergence que d'une fraction de degré. Pour un écran au-dessous de 6,5 mètres de base, la relation entre la convergence et l'accommodation des yeux entraîne que les décalages de lointains s'en trouvent limités à un maximum de 2,5 % de la largeur de l'image. Des explications détaillées sont développées dans le « Livre blanc du relief (3Ds) » de la Ficam³⁰.

Nous avons indiqué que la distance minimale de confort visuel pour la première rangée est égale à la largeur de l'écran réduite d'un facteur 0,8. La réalité de l'exploitation se situe plus proche de la norme NF S27001 : facteur minimum pour le premier rang de 0,6. Celle de la dernière rangée est recommandée inférieure ou égale au double de la largeur d'écran. Dans le cas, par exemple, d'une salle de cinéma avec un écran de 13 par 6 m et d'une distance à l'écran des sièges de 8 m à 24 m environ, il est préconisé 6,5 à 8 cm de parallaxe horizontale absolue maximale, ce qui donne pour les premiers sièges 0,5 à 0,6 degrés ($2 \times \arctg(4/800)$) en parallaxe horizontale angulaire maximale. C'est deux fois moins que pour des usages en réalité virtuelle, mais la durée de projection des films est longue. Plus les spectateurs sont éloignés de l'écran, moins ils subissent de contrainte visuelle. Pour les sièges en fond de salle, la parallaxe horizontale angulaire maximale est de $0,15^\circ$ ($2 \times \arctg(4/2400)$).

5.2.7 Formule employée à la télévision HD :

Il est recommandé une distance d'observation de 1,9 m pour un écran plat HDTV 1080p de 50 pouces (127 cm) de diagonale, largeur 110 cm, nombre de pixels : 1920 x 1080 (17 pixels sur 1 cm). D'après le tableau du CST, il est préconisé 3 cm de parallaxe horizontale absolue maximale ou 50 pixels, ce qui donne en parallaxe horizontale angulaire maximale : $2 \arctg(1,5/190) = 0,9^\circ$.

En résumé, la limitation des disparités rétinienne pour l'observateur d'images stéréoscopiques est déterminée par diverses formules, mais qui dépendent du domaine d'activités concerné. Elles ont toutes pour objectif de limiter l'inconfort d'observation des images stéréoscopiques, mais en considération principalement statique de la fusion des images stéréoscopiques. Les valeurs limites de parallaxe horizontale angulaire sont un peu différentes car l'inconfort visuel dépend d'autres facteurs, en premier la durée d'exposition. Plus précisément, l'inconfort visuel dépend de la durée et de l'amplitude des disparités rétinienne imposées à l'observateur. Il dépend aussi du type d'images stéréoscopiques observées : les images à haute fréquence spatiale sont plus difficiles à fusionner, l'accommodation étant évidemment plus contrainte pour l'observateur que lorsque les images sont à basses fréquences spatiales, c'est-à-dire plus floues. C'est pour cette raison que le fond des images, à grande disparité rétinienne dans la plupart des cas, peut être flouté pour un meilleur confort visuel.

L'inconfort visuel dépend aussi du mouvement de l'objet (ou de la zone) observé(e). Plus le mouvement est rapide, plus il est difficile de fusionner. Les objets (ou zone) en mouvement doivent être affichés avec des parallaxes horizontales angulaires plus faibles que pour des objets statiques. Plus généralement, on sait que la dynamique des images stéréoscopiques crée des contraintes oculomotrices sur le système visuel de l'observateur.

À ce jour, il n'y a pas de travaux de recherche exhaustifs sur l'inconfort visuel dû à la dynamique de ces images, qui imposent des variations d'accommodation, de vergence ainsi que des saccades non naturelles des yeux.

³⁰ « Le Livre Blanc du Relief (3Ds) au cinéma et à la télévision », http://www.dig-it.fr/wp-content/uploads/downloads/2012/05/LivreBlancReliefV2_BasseDef1.pdf.

6 Estimation des effets sanitaires des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique (3Ds)

6.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les questions de sécurité sanitaire liées à l'usage des écrans de visualisation ont été largement explorées. Cependant, les effets liés spécifiquement à la visualisation stéréoscopique ont été peu étudiés [Howarth, 2011].

La littérature scientifique disponible décrit l'inconfort visuel comme étant le problème sanitaire le plus fréquent posé par les technologies audiovisuelles en 3Ds. Les notions de confort et de fatigue visuelle seront présentées dans cette partie. Ce sont des notions équivalentes mais qui font appel à des critères de jugement différents. Le confort visuel est apprécié à l'aide de constats subjectifs, alors que l'on peut mesurer physiologiquement la fatigue visuelle. Un nombre important de symptômes sont associés à la fatigue ou au confort visuel, il en sera donné une description. Ces symptômes peuvent avoir plusieurs causes dont les principales sont les effets du « conflit accommodation-vergence » et les effets liés à des distances d'affichage inadaptées par rapport à la profondeur de champ du système visuel.

6.2 Effets sanitaires identifiés

En analysant la littérature scientifique, le groupe de travail a identifié différents effets sanitaires potentiels liés aux interfaces audiovisuelles en 3Ds, l'effet le plus important étant la fatigue visuelle.

Les risques sanitaires liés aux interfaces visuelles en 3Ds sont très dépendants des capacités visuelles de l'observateur (différences individuelles importantes) ainsi que de la qualité technologique des interfaces audiovisuelles 3Ds et des contenus utilisés.

Les différentes technologies stéréoscopiques (avec lunettes) et auto-stéréoscopiques (sans lunettes) ne changent pas le problème de fond (conflit accommodation-vergence). De nouvelles technologies se développent cependant (holoscopie et holographie) qui ont le potentiel de supprimer le conflit accommodation-vergence [Kovacs et Balogh, 2013].

6.2.1 Confort visuel et fatigue visuelle

6.2.1.1 Considérations générales

Dans la littérature scientifique, le terme de « confort visuel » est utilisé de façon interchangeable avec le terme de « fatigue visuelle ». Une distinction doit cependant être faite. La fatigue visuelle se réfère à une baisse des performances du système visuel, ce qui peut être mesuré objectivement. Le confort visuel est sa contrepartie subjective. Cette relation est généralement admise, mais à notre connaissance n'a jamais été soigneusement vérifiée [Lambooi *et al.*, 2009]. La fatigue visuelle pouvant apparaître suite à une exposition aux technologies stéréoscopiques est difficilement discernable de la fatigue visuelle pouvant apparaître lors d'une exposition à des écrans classiques monoscopiques.

La fatigue visuelle est généralement estimée à l'aide d'outils permettant d'évaluer l'intensité de certains symptômes. Le confort visuel perçu déterminé par des mesures subjectives (questionnaires) devrait fournir une indication de la fatigue visuelle objectivement mesurable.

Le terme médical utilisé pour la fatigue visuelle est « asthénopie » et signifie littéralement « l'œil sans force ». L'asthénopie regroupe l'ensemble des symptômes liés à la fatigue des muscles oculomoteurs et ciliaires, tels des douleurs oculaires, des maux de tête, de la diplopie³¹ voire des vertiges.

On distingue plusieurs variétés d'asthénopie dont les deux principales sont :

- l'asthénopie accommodative : la plus fréquente, notamment en cas d'anomalie de la réfraction de l'œil comme une hypermétropie, un astigmatisme, une myopie ou une presbytie. Elle concerne le mécanisme visuel de l'accommodation et est due le plus souvent aux efforts oculaires et à la fatigue des muscles ciliaires secondaires à un travail visuel prolongé et/ou intense.
- l'asthénopie musculaire : elle est secondaire à un effort anormal d'utilisation du réflexe d'accommodo-convergence qui permet aux yeux de fixer une image de façon constante et harmonieuse. D'autres muscles participent à cet effort comme les muscles palpébraux ou frontaux.

Une grande partie des recherches menées dans le passé portent sur la fatigue visuelle, même si sa conceptualisation demeure ambiguë. En effet, des définitions différentes sont utilisées selon les domaines, il n'existe pas de définition absolue [Hagura *et al.*, 2006 ; Bangor, 2000]. Dans la plupart des cas, la fatigue visuelle est définie comme une combinaison de facteurs et de symptômes sous-jacents.

6.2.1.2 Symptômes associés à la fatigue visuelle

Les symptômes de la fatigue visuelle associés à la visualisation de contenu 3Ds sont décrits dans plusieurs publications [Dillon et Emurian, 1996 ; Sheedy *et al.*, 2003 ; Emoto *et al.*, 2005 ; Uetake *et al.*, 2000 ; Murata *et al.*, 2001 ; Cooper *et al.*, 2001, Blehm *et al.*, 2005] :

- l'asthénopie accommodative (fatigue et douleurs péri-oculaires) ;
- la sensation d'œil sec, les troubles de la vision (diplopie, une sensibilité réduite aux contrastes spatiaux, une diminution de l'acuité visuelle et de la rapidité de perception) ;
- les troubles extra-oculaires (comme les maux de tête, les douleurs au cou, les maux de dos et aux épaules, des baisses de performances dans les activités mentales, des pertes de concentration).

6.2.1.3 Mesure de l'intensité de la fatigue visuelle

La conséquence de ces nombreux facteurs étiologiques est qu'il existe un nombre important d'indicateurs de mesure de la fatigue et du confort visuel, qui ont été standardisés [Bangor, 2000 ; Emoto *et al.* 2005, Uetake *et al.*, 2000]. Il existe des indicateurs subjectifs de confort visuel, relatifs au jugement de la personne à qui l'on soumet, par exemple, un questionnaire et des indicateurs objectifs de fatigue visuelle, qui peuvent être mesurés avec des outils scientifiques.

Les indicateurs objectifs permettant de mesurer la fatigue visuelle sont par exemple le diamètre pupillaire, l'acuité visuelle, le champ visuel, le rapport de convergence accommodative, la capacité de convergence des yeux, *etc.* Lambooij et ses collaborateurs en donnent une liste exhaustive [Lambooij *et al.*, 2009].

Pour mesurer le confort visuel, un des indicateurs subjectifs employés est le recours aux questionnaires d'auto-évaluation utilisés avec des échelles de satisfaction. Il n'existe pas à ce jour de questionnaire standardisé reconnu par la communauté scientifique comme étant suffisamment fiable. Le diamètre pupillaire peut convenir à l'évaluation de la fatigue visuelle, car il est en

³¹ La diplopie est un signe fonctionnel traduisant une vision double d'un objet.

corrélation avec les réponses pupillaires qui reflètent l'activité du système nerveux et donc les fonctions d'accommodation [Uetake, 2000 ; Murata, 2001].

Emoto et ses collaborateurs [Emoto *et al.*, 2004] ont évalué en 2004 les effets d'une TV 3Ds (lumière polarisée) par rapport à une TV monoscopique. Les expériences ont été menées sur un groupe de 13 personnes, d'une moyenne d'âge de 29,7 ans, ayant une vision stéréoscopique normale. Le temps d'exposition était de 60 minutes pour chaque technologie. Les participants remplissaient un questionnaire renseignant leurs éventuels symptômes avant et après leur exposition. Leur fusion d'amplitude ainsi que le rapport de convergence accommodative (AC/A) étaient mesurés de manière systématique. Les expériences montrent une augmentation des symptômes subjectifs après une exposition à une TV 3Ds, ainsi qu'une diminution de l'amplitude de fusion³². Le rapport de convergence accommodative reste quant à lui inchangé. La mesure de l'amplitude de fusion semble être un bon indicateur de la fatigue visuelle du téléspectateur.

Un point essentiel dans la détermination de la fatigue visuelle est l'apparition de symptômes différents mais dont la source est commune. Par exemple, des conflits dans la convergence des yeux peuvent stimuler différentes localisations anatomiques et ainsi générer des symptômes différents. Par conséquent, la fatigue visuelle ne peut être évaluée par un seul indicateur. En outre, bon nombre des changements oculaires interprétés comme de la fatigue visuelle peuvent également être considérés comme une caractéristique du système biologique s'adaptant à une modification de son environnement visuel.

6.2.1.4 Hypothèses d'étiologie de la fatigue visuelle

Les causes de la fatigue visuelle sont très diverses et, par conséquent, des recherches à ce sujet sont toujours en cours. Dans le domaine des terminaux d'écran de visualisation, la fatigue visuelle peut être provoquée ou induite par des anomalies de la vision ou par des problèmes liés à l'affichage. Dans le cas de la 3Ds, une des causes principales qui suscitent les symptômes de fatigue visuelle est le conflit d'accommodation-vergence, présenté ci-dessous. Le fait d'afficher les images en dehors du champ de profondeur de l'œil augmente aussi la fatigue visuelle. Cette partie se conclut sur une évocation de l'ensemble des paramètres qui peuvent intervenir dans le déclenchement ou l'augmentation de la fatigue visuelle.

Conflit accommodation-vergence

Dans la vision de la réalité, les yeux convergent et accommodent à la même distance, c'est-à-dire au centre de l'objet visualisé. Les technologies en 3Ds actuelles présentent la particularité de ne pas respecter ce principe physiologique. Les yeux convergent à la distance de l'image virtuelle mais accommodent à l'endroit où il y a le plus de lumière, c'est à dire au niveau de l'écran. L'accommodation et la convergence ne se fait ainsi pas à la même distance.

Cet aspect est connu depuis la création des technologies audiovisuelles en 3Ds. Le conflit accommodation – vergence est la cause principale de la fatigue visuelle, ce qui est décrit dans les dernières études de Hoffman et ses collaborateurs de l'Université de Berkeley [Hoffman *et al.*, 2008]. Ils ont montré en 2008, sur une population de 11 personnes âgées de 23 à 31 ans, que le conflit d'accommodation-vergence dans l'affichage virtuel en 3Ds altère les performances visuelles et cause de la fatigue visuelle. Les personnes ont visualisé deux systèmes 3Ds différents : l'un présentant pour le téléspectateur un conflit d'accommodation-vergence (système 3Ds conventionnel) et l'autre pas (système 3Ds volumétrique [Akeley *et al.*, 2004]). Le temps d'exposition des personnes lors de ces expériences était de 45 minutes. Les symptômes relevés à

³² Pour que la fusion des images perçues par chaque œil soit optimale, les yeux doivent pouvoir effectuer de rapides mouvements de fovéation. Ces mouvements visent à rétablir une vision simultanée sur la totalité de l'image à fusionner, c'est-à-dire à annuler la disparité perçue. L'amplitude sur laquelle ces mouvements de fovéation ou de fusion doivent pouvoir être réalisés est normalement de l'ordre de 5' en horizontal. Cette amplitude est appelée amplitude fusion.

l'aide d'un questionnaire étaient : fatigue oculaire, vision troublée, mal à la nuque et au dos, maux de tête. Ces symptômes étaient augmentés de manière importante lorsque les personnes visualisaient une technologie 3Ds présentant des conflits d'accommodation-vergence.

Distance d'affichage et profondeur de champ

Yano et ses collaborateurs [Yano *et al.*, 2004] ont montré que si les images d'une télévision stéréoscopique sont projetées à des distances correspondant à la profondeur de champ de l'œil, alors la fatigue visuelle ressentie est comparable à celle ressentie lorsque les images sont projetées sur l'écran. Par contre, si les images sont projetées en avant ou en arrière de la profondeur de champ de l'œil, la fatigue visuelle apparaît clairement. Il a été aussi montré que si les images sont projetées dans le champ de profondeur de l'œil mais à des distances variables dans le temps, la fatigue visuelle survient. Ces études ont été réalisées sur 6 personnes avec des temps d'exposition d'environ 60 minutes entrecoupées de pauses. Des tests d'auto-évaluation de fatigue visuelle étaient effectués avant et après exposition, les capacités d'accommodation étaient aussi mesurées. La technologie de télévision stéréoscopique utilisée était celle utilisant des lunettes 3Ds actives.

Emoto et ses collaborateurs ont montré en 2005 [Emoto *et al.*, 2005] que des efforts de convergence répétés causaient un déclin des fonctions visuelles lors de l'usage d'un téléviseur stéréoscopique.

Autres causes

D'autres raisons peuvent expliquer la fatigue visuelle ressentie après une exposition aux technologies 3Ds, notamment les capacités visuelles de l'observateur ou la qualité technique de l'affichage 3D. Les anomalies de la vision pouvant exacerber la fatigue visuelle sont : l'ésophorie³³, une convergence insuffisante, des dysfonctionnements dans l'accommodation, des erreurs de réfraction non corrigées (incluant aussi la presbytie), *etc.* Les problèmes liés à l'affichage peuvent être liés à une qualité d'image compromise, à des battements dans les *stimuli*, à des angles d'observation non optimaux, à la distance de lecture, ou à la technologie d'affichage [Bangor, 2000 ; Dillon and Emurian, 1996 ; Sheedy *et al.*, 2003 ; Blehm *et al.*, 2005].

6.2.2 Les autres effets

D'autres effets sanitaires peuvent potentiellement apparaître, notamment des effets liés à l'équilibre postural (vertiges) ou des effets liés à l'appréciation du réel (altération de la perception de l'environnement). Ces effets liés à une exposition aux interfaces 3Ds restent encore mal étudiés.

L'interaction entre le conflit sensori-moteur vergence-accommodation et l'engagement émotionnel du spectateur lié à l'esthétisme du 3Ds n'est pas connue.

6.3 Populations potentiellement à risque

Chez l'enfant et jusqu'à l'adolescence, le couplage physiologique « accommodation-vergence » poursuit sa maturation. Certaines recherches fondamentales [Kapoula *et al.*, 2012]³⁴ suggèrent que l'exposition à des conflits de l'accommodation-vergence de faible amplitude chez des enfants de 13 à 17 ans peut être plus perturbatrice que l'exposition à des conflits plus importants. Chez d'autres catégories d'âge, la tolérance au conflit accommodation-vergence n'est pas connue.

³³ Esophorie : strabisme convergent latent constaté lorsque les yeux sont au repos physiologique.

³⁴ Kapoula Z., Gaertner C., Matheron, E., *Spherical lenses and prisms lead to postural instability in both dyslexic and non dyslexic adolescents.* Plos one, 2012, 7(11)

Les personnes sujettes à des troubles infra-cliniques spécifiques (déficits vestibulaires, hétérophorie, insuffisance de vergence, strabisme accommodatif, etc.) peuvent faire partie des populations à risque, car ils pourraient présenter un seuil de tolérance plus bas au conflit accommodation-vergence.

6.4 Exposition des populations

6.4.1 Un manque de données d'exposition aux technologies d'affichage 3Ds

Il n'existe pas à ce jour de données d'exposition de la population aux technologies audiovisuelles en 3Ds. Cependant, des études récentes de l'Insee montrent que l'exposition de la population à la télévision et aux jeux vidéo peut atteindre plusieurs heures par jour. De ce fait, il est vraisemblable que ces taux d'exposition se transposent partiellement dans les années qui viennent aux technologies en 3Ds. Le développement des interfaces dans le domaine des loisirs laisse donc présager d'une augmentation potentiellement forte du temps d'exposition, notamment pour les plus jeunes.

Il existe des systèmes de conversion dits 2D/3D qui transforment un contenu monoscopique en un contenu stéréoscopique par des algorithmes plus ou moins automatiques et plus ou moins performants. Pour le cinéma, des films réalisés en monoscopique ont été convertis en 3Ds généralement avec une intervention manuelle. Pour les écrans 3Ds, il est maintenant possible pour le téléspectateur de transformer à volonté un contenu 2D en un contenu 3Ds, en faisant qui plus est varier la quantité de parallaxe.

Cela pose la question d'une augmentation potentiellement forte (temps d'exposition) et non contrôlée (quantité de parallaxe horizontale et qualité de l'expérience 3D liée au contenu converti) de l'exposition à la 3Ds.

De plus, avec le développement et l'exploitation des technologies 3Ds, les populations professionnelles peuvent être amenées elles aussi à être plus exposées. Les durées d'exposition pourraient néanmoins être mieux contrôlées dans ces domaines et les effets potentiels mieux suivis que dans le grand public.

6.4.2 Présentation de quelques données d'exposition pour l'affichage monoscopique traditionnel

Bien qu'il n'existe pas de données d'exposition aux technologies 3Ds, il est malgré tout intéressant de présenter des informations concernant la fréquentation des cinémas, l'utilisation de la télévision ou des jeux vidéos en monoscopique. Ces données ne présagent évidemment pas de l'exposition de la population aux technologies 3Ds si ces technologies étaient amenées à se généraliser. Les données présentées ci-dessous sont issues d'enquêtes nationales réalisées par l'Insee ou l'institut de sondage TNS Sofres. L'ordre de présentation des données suit la chronologie d'apparition des technologies en 3Ds pour la population : cinéma, télévision puis jeux vidéo.

Cinéma

Une étude de l'Insee intitulée « Statistiques sur les ressources et les conditions de vie » a été publiée en 2006. Elle a été menée en France métropolitaine auprès d'individus âgés de 16 ans ou plus. Les populations les plus jeunes (de moins de 39 ans) fréquentent au moins une fois par an les cinémas. Les personnes de moins de 24 ans vont au cinéma plus fréquemment, 37 % y vont plus de 7 à 12 fois par an.

Télévision

Une étude de l'Insee intitulée « Enquête permanente sur les conditions de vie » a été publiée en 2005. Elle a été menée en France métropolitaine auprès d'individus âgés de 15 ans ou plus. Quatre-vingt deux pour cent des individus déclarent regarder la télévision tous les jours ou

presque. Quatre-vingt treize pour cent des individus de 60 ans ou plus ont regardé la télévision tous les jours ou presque au cours des douze derniers mois, dont 23 % qui l'ont fait plus de 4 heures par jour. Soixante dix-huit pour cent des 15-24 ans déclarent regarder la télévision tous les jours, dont 35 % 2 à 4 heures par jour.

Jeux vidéo

Une enquête TNS Sofres publiée le 18 novembre 2010 intitulée « Les adolescents et les jeux vidéo » a été réalisée par téléphone à domicile auprès d'un échantillon national représentatif de 500 adolescents âgés de 12 à 17 ans entre le 9 et le 11 septembre 2010. La question « À quoi joues-tu le plus souvent ? » a été posée à 447 adolescents âgés de 12 à 17 ans et qui déclarent jouer sur plusieurs supports.

L'ordinateur est le support privilégié pour jouer aux jeux vidéo (76 %), devant la console de salon (55 %), la console portable (43 %) et le téléphone portable (25 %). Les garçons jouent plus avec les consoles de salon que les filles (72 % contre 39 %). Une grande majorité des 14-15 ans jouent avec les consoles de salon et plus de la moitié des 12-13 ans jouent avec une console portable. Les filles jouent plus sur les téléphones portables que les garçons (35 % contre 14 %).

Dans le cadre de l'enquête TNS Sofres, 248 adolescents âgés de 12 à 17 ans ont été interrogés sur leur temps passé à jouer aux jeux vidéo. Les résultats montrent que la majorité des adolescents jouent plus d'une heure par jour en semaine aux jeux vidéo. Ce phénomène s'accroît le week-end où ils sont plus de 70 % à jouer plus d'une heure par jour.

7 Conclusions et recommandations du groupe de travail

Pour la population générale :

Le groupe de travail recommande de porter à la connaissance du public le fait que les individus ne sont pas tous physiologiquement égaux face aux technologies audiovisuelles 3Ds. Les différences individuelles à prendre en compte sont nombreuses : âge, qualité de la vision stéréoscopique, présence d'autres pathologies visuelles pouvant entrer en jeu, *etc.*

La fatigue visuelle pouvant apparaître lors de la visualisation de contenu 3Ds est liée dans sa majeure partie au conflit accommodation-vergence sous-jacent aux interfaces 3Ds. Les symptômes liés à cette fatigue visuelle sont nombreux et variés (maux de tête, fatigue oculaire, yeux rouges, *etc.*). En l'état actuel des connaissances et des niveaux d'exposition, ces symptômes semblent être transitoires.

Le groupe de travail recommande que les personnes ressentant des symptômes lors de l'exposition à des interfaces 3Ds limitent leur temps d'exposition et invite ces mêmes personnes à consulter des professionnels de la santé visuelle afin de dépister d'éventuelles pathologies visuelles.

Le groupe de travail recommande que les professionnels de la 3Ds et les pouvoirs publics mettent à disposition des utilisateurs l'information sur les symptômes potentiellement ressentis et les conditions d'exposition recommandées (présentées au paragraphe 5.2 du présent rapport : par exemple s'éloigner de l'écran au cinéma ou réduire la parallaxe horizontale sur une TV 3Ds en cas d'inconfort visuel). Le groupe de travail tient à alerter les pouvoirs publics que pour les personnes ayant ressentis des symptômes après une exposition aux technologies 3Ds, l'exposition aux technologies 3Ds pourrait être accidentogène (par exemple reprise de la conduite dans un état non adapté).

Le groupe de travail recommande que les utilisateurs gardent leurs corrections optiques pendant la visualisation de contenus 3Ds.

De manière générale, le groupe de travail considère pertinent que les organismes publics créent un site internet à vocation pédagogique vulgarisant le principe de la vision binoculaire, les principes de fonctionnement des technologies 3Ds et les effets sanitaires potentiels, notamment ceux liés au conflit accommodation-vergence.

Pour les enfants et les adolescents

Le groupe de travail, ayant déterminé plusieurs âges clef dans le développement du système visuel, recommande :

- de ne pas exposer les enfants de moins de 6 ans³⁵ aux technologies 3Ds, ceux-ci étant moins à même d'exprimer leur ressenti ou inconfort,
- de limiter l'exposition des adolescents de moins de 13 ans et d'être attentif aux éventuels symptômes induits.

Le groupe de travail incite à sensibiliser les professionnels médicaux et paramédicaux de la petite enfance et les ophtalmologistes sur les mécanismes mis en jeu lors de la visualisation d'interfaces 3Ds afin qu'ils puissent informer les parents.

Pour les utilisateurs professionnels

Compte tenu du développement potentiel des technologies 3Ds dans le monde du travail, le groupe de travail recommande d'adapter les temps d'exposition des professionnels à ces technologies selon les tâches assignées et leurs sensibilités individuelles. Le groupe de travail recommande que les services de médecine du travail informent les salariés des mécanismes mis en jeu lors de la visualisation d'interfaces 3Ds, pour dépister d'éventuelles pathologies visuelles et effectuer un suivi des salariés exposés dans la durée.

Pour les industriels de la 3Ds (stéréographes, producteurs de film, etc.)

Le groupe de travail recommande d'employer auprès du public la terminologie appropriée aux technologies utilisant la vision stéréoscopique : technologies 3D stéréoscopique ou en abrégé « 3Ds » et non « 3D », afin d'éviter la confusion avec la représentation tridimensionnelle monoscopique.

Le groupe de travail recommande aux professionnels d'informer le public du risque d'inconfort visuel (incohérence accommodation – vergence) lié à l'usage des technologies 3Ds et de la façon d'y remédier.

Plus le spectateur est éloigné de l'écran stéréoscopique (de cinéma ou de télévision), moins celui-ci subit de grandes disparités rétinienne et donc moins de contraintes sur son système visuel. Il est donc recommandé pour un spectateur sujet à de l'inconfort visuel en regardant des images stéréoscopiques de ne pas se positionner trop proche de l'écran 3Ds. En contre-partie, plus le spectateur est éloigné de l'écran, plus les effets de profondeur dus à la vision binoculaire sont faibles. De plus, il est possible sur certains écrans de téléviseurs 3Ds ou de consoles de jeux 3Ds de faire varier la parallaxe horizontale absolue du couple d'images stéréoscopiques pour augmenter ou diminuer les effets de profondeur dus à la vision binoculaire. Dans ce cas, il est aussi recommandé pour un spectateur sujet à de l'inconfort visuel de ne pas trop augmenter la parallaxe horizontale absolue, générant des disparités rétinienne trop importantes. Il est conseillé pour tout spectateur d'utiliser les écrans de téléviseurs 3Ds ou de consoles de jeux 3Ds en respectant les recommandations données par les constructeurs des dispositifs 3Ds

Dans l'objectif de limiter la fatigue visuelle, le groupe de travail recommande de prendre en compte notamment les facteurs suivants lors de la création de contenu 3Ds :

- limitation de la disparité rétinienne en amplitude, en variation et en durée ;
- minimisation de la parallaxe verticale, des effets de bords d'écran, des différences chromatiques inter-vues en fonction des fréquences spatiales des images (flou des images), etc.

³⁵ à l'exception des méthodes thérapeutiques sous contrôle médical.

Il est à noter que la limitation de la disparité rétinienne de l'observateur revient à limiter la parallaxe horizontale angulaire. Cette dernière dépend de la parallaxe horizontale absolue (distance sur l'écran de deux points homologues du couple d'images stéréoscopiques) et de la distance de l'observateur à l'écran. Si cette dernière est variable, il faut considérer le cas le plus défavorable.

D'une manière générale, le groupe de travail suggère que les professionnels suivent les recommandations émises par les groupes et *consortia* de professionnels.

Recommandations d'études et de recherche

Les technologies stéréoscopiques génèrent un conflit entre les processus d'accommodation et de vergence. Les effets sanitaires de l'exposition à de telles technologies n'ont été que partiellement étudiés chez l'adulte et rarement chez l'enfant. Les études menées jusqu'à présent sont basées sur une évaluation orthoptique fournissant des mesures de nature qualitative. Dans ce domaine, la dynamique physiologique de la motricité oculaire ainsi que les synergies entre vergence, accommodation et saccades restent inexplorées.

Données sur l'exposition

Compte tenu du manque de données concernant l'exposition de la population aux technologies 3Ds, le GT recommande d'identifier les usages de la 3Ds ainsi que les populations concernées et de mettre en place un suivi des expositions associées.

Données fondamentales et épidémiologiques

Compte tenu du manque de données le GT recommande que des recherches fondamentales et épidémiologiques, le cas échéant, soient encouragées sur les thèmes suivants :

- développement des systèmes binoculaires visuel et visuo-moteur de l'enfant, maintien et vieillissement du fonctionnement de ces systèmes binoculaires à l'âge adulte ;
- quantification d'altérations éventuelles du système visuo-moteur (saccade, accommodation, vergence et synergie entre ces composantes) pendant et après la visualisation de contenus stéréoscopiques versus monoscopiques ;
- conséquences à long terme des expositions à la 3Ds sur la vision à tous les âges de la vie, notamment :
 - une exposition unique peut-elle entraîner une décompensation permanente de la synergie accommodation-vergence et / ou des déséquilibres posturaux dans le cas d'un terrain fragile ?
 - le fait de ressentir de manière répétée des effets transitoires à court terme peut-il engendrer des effets sanitaires permanents ?
- conséquences psychologiques liées spécifiquement à la 3Ds (engagement émotionnel dans le cadre des loisirs, effet immersif, etc.) ;
- effets d'une exposition à la 3Ds sur le système vestibulaire, l'équilibre et le contrôle postural et la marche.

Il est souhaitable que ces études soient menées suivant une approche pluridisciplinaire engageant des compétences en création 3Ds, en oculomotricité binoculaire, en psychophysique de la vision, en orthoptie ophtalmologie équilibre et en posturologie.

De même, il y aurait un intérêt à réaliser de telles études chez diverses populations saines et sensibles (enfants ou adultes avec troubles oculomoteurs ou troubles d'équilibre).

Compte tenu du manque de données concernant la caractérisation de la vision binoculaire dans la population générale, le groupe de travail recommande de mettre en œuvre une étude épidémiologique pour évaluer dans différentes tranches d'âge la qualité de la vision binoculaire et la prévalence des troubles (insuffisance de convergence, anisométrie, phorie, amblyopie, microstrabisme, troubles de l'équilibre en l'absence de pathologies vestibulaires, qualité de la vision binoculaire chez la personne âgée incluant les personnes sujettes à des chutes en l'absence de pathologie identifiée).

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 19 janvier 2014.

Bibliographie

- Akeley, K., Watt, S. J., Girshick, A. R., & Banks, M. S. (2004). A stereo display prototype with multiple focal distances. *ACM Transactions on Graphics*, 23, 804–813.
- Allison R. S., "Analysis of the influence of vertical disparities arising in toed-in stereoscopic cameras," *J. Imaging Sci. Technol.*, vol. 51, no.4, pp. 317–327, 2007.
- Anaes, 2002, Dépistage précoce des troubles de la fonction visuelle chez l'enfant pour prévenir l'amblyopie.
- Anderson, H.A., Hentz, G., Glasser, A., Stuebing, K.K., & Manny, R.E. (2008). Minuslens-stimulated accommodative amplitude decreases sigmoidally with age: a study of objectively measured accommodative amplitudes from age 3. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 49 (7), 2919-2926.
- Anoh-Tanon MJ, Bremond-Gignac D, Wiener-Vacher SR, Vertigo is an underestimated symptom of ocular disorders: dizzy children do not always need MRI, *Pediatr Neurol*. 2000 Jul;23(1):49-53.
- Atchison DA. SG. *Optics of the Human Eye*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2000.
- Atkinson, J., Braddick, O., & French, J. (1980). Infant astigmatism: its disappearance with age. *Vision Res*, 20 (11), 891-893.
- Atkinson, J., Braddick, O., Nardini, M., & Anker, S. (2007). Infant hyperopia: detection, distribution, changes and correlates-outcomes from the cambridge infant screening programs. *Optom Vis Sci*, 84 (2), 84-96.
- Arnulf A, Dupuy O. The transmission of contrasts by the optical system of the eye and the retinal thresholds of contrast. *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci*. 1960; 250:2757–9.
- Bando T, Toda H. Cerebral cortical and brainstem areas related to the central control of lens accommodation in cat and monkey. *Comp. Biochem. Physiol. C, Comp. Pharmacol. Toxicol*. 1991; 98(1):229–37.
- Bando T, Tsukuda K, Yamamoto N, Maeda J, Tsukahara N. Physiological identification of midbrain neurons related to lens accommodation in cats. *J. Neurophysiol*. 1984; 52(5):870–8.
- Bando T, Yamamoto N, Tsukahara N. Cortical neurons related to lens accommodation in posterior lateral suprasylvian area in cats. *J. Neurophysiol*. 1984; 52(5):879–91.
- Bangor A.W., (2000), Display technology and ambient illumination influences on visual fatigue at VDT workstation, PhD Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Banks, M.S. (1980). The development of visual accommodation during early infancy. *Child Dev*, 51 (3), 646-666.
- Barlow H. B., Blakemore C., and Pettigrew J. D., "The neural mechanism of binocular depth discrimination," *Journal of Physiology*, vol. 193, pp. 327–342, 1967.
- Birch EE, Gwiazda J, Held R. The development of vergence does not account for the onset of stereopsis. *Perception* 1983; 12:331-6.
- Birch EE, Held R. The development of binocular summation in human infants. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1983;24:1103-7.
- Birch, E.E., & Swanson, W.H. (1992). Probability summation of acuity in the human infant. *Vision Res*, 32 (10), 1999-2003.

Birch and Salomao, 1998, Infant random dot stereoacuity cards, *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, 35 (2) (1998), pp. 86–90 Blake R. and Wilson H. R., “Neural models of stereoscopic vision. trends in neurosciences,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 14, pp. 445–452, 1991.

Blehm C., Vishnu S., Khattak A., Mitra S., and Yee R. W. (2005), *Computer Vision Syndrome: A Review*, *Survey of Ophthalmology* 50: 253-262.

Bobier, W.R., Guinta, A., Kurtz, S., & Howland, H.C. (2000). Prism induced accommodation in infants 3 to 6 months of age. *Vision Res*, 40 (5), 529-537.

Brémond-Gignac D, Copin H, Lapillonne A, Milazzo S; European Network of Study and Research in Eye Development. Visual development in infants: physiological and pathological mechanisms. *Curr Opin Ophthalmol*. 2011;22:S1-8.

Bremond-Gignac D. ; Lassau J. P. ; Elmaleh M. ; Vuillardd-Aron-Rosa E., Anatomie oculo-orbitaire et résonance magnétique nucléaire: application à la croissance oculaire et à la pathologie fœtale, *Revue de stomatologie et de chirurgie maxillo-faciale*, 1994, vol. 95, n°5, pp. 359-362.

Brandt T, 1999, *Vertigo: Its multisensory syndromes*. Springer-Verlag, London.

Brown N. The change in shape and internal form of the lens of the eye on accommodation. *Exp. Eye Res*. 1973; 15(4):441–59.

Bucci MP, Kapoula Z, Bui-Quoc E, Bouet A, Wiener-Vacher S. Saccades and vergence performance in a population of children with vertigo and clinically assessed abnormal vergence capabilities. *PLoS One*. 2011;6(8):e23125. doi:10.1371/journal.pone.0023125. Epub 2011 Aug 9. PubMed PMID: 21858007; PubMed Central PMCID: PMC3153477.

Bucci M.P., Bremond-Gignac D., Kapoula Z., 2008a. Latency of saccades and vergence eye movements in dyslexic children. *Exp Brain Res*, 188: 1-12.

Bucci M.P., Bremond-Gignac D., Kapoula Z., 2008b. Poor binocular coordination of saccades in dyslexic children. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 246: 417-428.

Bucci M.P., Bremond-Gignac D., Kapoula Z., 2009a. Speed and accuracy of saccades, vergence and combined eye movements in subjects with strabismus before and after eye surgery. *Vision Res*, 49: 460-469.

Bucci M.P., Kapoula Z., 2006. Binocular coordination of saccades in 7 years old children in single word reading and target fixation. *Vision Res*, 46: 457-466.

Bucci M.P., Kapoula Z., Bernotas M., Zamfirescu F., 1999a. Role of attention and eye preference in the binocular coordination of saccades in strabismus. *Neuro-ophthalmology*, 22: 115-126.

Bucci M.P., Kapoula Z., Eggert T., Garraud L., 1997. Deficiency of adaptive control of the binocular coordination of saccades in strabismus. *Vision Res*, 37: 2767-2777.

Bucci M.P., Kapoula Z., Yang Q., Bremond-Gignac D., 2006. Latency of saccades, vergence, and combined movements in children with early onset convergent or divergent strabismus. *Vision Res*, 46: 1384-1392.

Bucci M.P., Kapoula Z., Yang Q., Bremond-Gignac D., Wiener-Vacher S., 2004. Speed-accuracy of saccades, vergence and combined eye movements in children with vertigo. *Exp Brain Res*, 157: 286-295.

Bucci M.P., Kapoula Z., Yang Q., Roussat B., Bremond-Gignac D., 2002. Binocular coordination of saccades in children with strabismus before and after surgery. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 43: 1040-1047.

- Bucci M.P., Le T.T., Wiener-Vacher S., Bremond-Gignac D., Bouet A., Kapoula Z., 2009b. Poor postural stability in children with vertigo and vergence abnormalities. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 50: 4678-4684.
- Bucci M.P., Pouvreau N., Yang Q., Kapoula Z., 2005. Influence of gap and overlap paradigms on saccade latencies and vergence eye movements in seven-year-old children. *Exp Brain Res*, 164: 48-57.
- Cagnazzo, M., Pesquet-Popescu, B., Dufaux, F. 3D Video Representation and Formats, in F. Dufaux, B. Pesquet-Popescu and M. Cagnazzo, editors, *Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering*, Wiley, 2013.
- Cahen O. « L'image en relief, du film au numérique », ISBN : 9782911256424, éditeur Les Presses des Mines, 2011.
- Calloway SL, Lloyd IC, Henson DB. A clinical evaluation of random dot stereoacuity cards in infants. *Eye* 2001; 15:629-34.
- Campbell F. W., Cooper G. F., and Enroth-Cugell C., "The spatial selectivity of the visual cells of the cat," *Journal of Physiology*, vol. 203, no. 223-235, 1969.
- Ciner EB, Schanel-Klitsch E, Scheiman M. Stereoacuity development in young children. *Optom Vis Sci* 1991; 68:533-6.
- Ciner, E.B.; Schanel-Klitsch, E.; Herzberg, C.; *Optometry and Vision Science*, Volume 73, Issue 1, 1996, Pages 43-48, Stereoacuity development: 6 months to 5 years. A new tool for testing and screening.
- Ciuffreda KJ, Hokoda SC. Spatial frequency dependence of accommodative responses in amblyopic eyes. *Vision Res*. 1983; 23(12):1585-94.
- Ciuffreda K.J., Kapoor N., Rutner D., Suchoff I.B., Han M.E., Craig S., 2007. Occurrence of oculomotor dysfunctions in acquired brain injury: a retrospective analysis. *Optometry*, 78: 155-161.
- Ciuffreda K.J., Rutner D., Kapoor N., Suchoff I.B., Craig S., Han M.E., 2008. Vision therapy for oculomotor dysfunctions in acquired brain injury: a retrospective analysis. *Optometry*, 79: 18-22.
- Cooper J, Jamal, N. Convergence insufficiency--a major review, 2012, American Optometric Association.
- Cooper J. S., Burns C. R., Cotter S. A., Daum K. M., Griffin J. M., and Scheiman M. M., (2001), *Optometric clinical practice guideline care of the patient with accommodative and vergence dysfunction*, St. Louis, America, American Optometric Association.
- Denieul P. Effects of *stimulus* vergence on mean accommodation response, microfluctuations of accommodation and optical quality of the human eye. *Vision Res*. 1982; 22(5):561-9.
- De Courten, C., & Garey, L.J. (1983). [Morphological development of the primary visual pathway in the child]. *J Fr Ophthalmol*, 6 (2), 187-202.
- Devismes C. (2008), Thèse, Etude de l'influence des disparités horizontales et verticales sur la perception de la profondeur en champ visuel périphérique, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Dillon T. W. and Emurian H. H. (1996), Some factors affecting reports of visual fatigue resulting from use of a VDU, *Computers in Human Behaviour* 12: 49-59.
- Drover JR, Kean PG, Courage ML, Adams RJ. Prevalence of amblyopia and other vision disorders in young Newfoundland and Labrador children. *Can J Ophthalmol* 2008; 43:89-94.
- Durand JB, Zhu S, Celebrini S, Trotter Y. Neurons in parafoveal areas V1 and V2 encode vertical and horizontal disparities. *J Neurophysiol* 2002; 88:2874-9.

- Emoto M., Niida T., and Okano F. (2005) Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic video. *Journal of display technology*, 1;2:328-340.
- Emoto, M., Nojiri, Y., Okano, F. (2004) Changes in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV. *Displays*, 25 (2-3): 67-76.
- Fleet D. J., Wagner H., and Heeger D. J., "Neural encoding of binocular disparity : energy models, position shifts and phase shifts," *Vision Research*, vol. 36, pp. 1839–1857, 1996.
- Foix, S., Alenyà, G. and Torras, C. (2011). Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey, *IEEE Sensors Journal*, 11 (9), 1917-1926.
- Forte J, Peirce JW, Lennie P. Binocular integration of partially occluded surfaces. *Vision Res* 2002; 42:1225-35.
- Fuchs P., Moreau G. et autres auteurs, « Le Traité de la réalité virtuelle », volume 2 « Interfaçage, immersion et interaction en environnement virtuel », éditeur Les Presses des Mines, ISBN 2-911762-63-0, février 2006.
- Garding J, Porrill J, Mayhew JE, Frisby JP. Stereopsis, vertical disparity and relief transformations. *Vision Res* 1995; 35:703-22.
- Garey LJ. Structural development of the visual system of man. *Hum Neurobiol.* 1984;3:75-80.
- Gillam B, Lawergren B. The induced effect, vertical disparity, and stereoscopic theory. *Percept Psychophys* 1983; 34:121-30.
- Gordon, G.E., & McCulloch, D.L. (1999). A VEP investigation of parallel visual pathway development in primary school age children. *Doc Ophthalmol*, 99 (1), 1-10.
- Goubel F. Principes et contrôle des variables physiologiques. Equipements biomédicaux à l'hôpital et au laboratoire,. Paris: Maloine, 1981.
- Hagura, H.; Nakajima, M. Study of asthenopia caused by the viewing of stereoscopic images: measurement by MEG and other devices *Human Vision and Electronic Imaging XI*. Edited by Rogowitz, Bernice E.; Pappas, Thrasyvoulos N.; Daly, Scott J. *Proceedings of the SPIE*, Volume 6057, pp. 192-202 (2006).
- Harwerth RS, Smith EL. Binocular summation in man and monkey. *Am J Optom Physiol Optics* 1985; 62:439-446.
- Held R. T., Hui T. T., *A Guide to Stereoscopic 3D Displays in Medicine, Academic Radiology*, Volume 18, Issue 8, August 2011, Pages 1035-1048, ISSN 1076-6332.
- Hennessy RT, Iida T, Shina K, Leibowitz HW. The effect of pupil size on accommodation. *Vision Res.* 1976; 16(6):587–9.
- Hillis JM, Banks MS. Are corresponding points fixed? *Vision Res* 2001; 41:2457-73.
- Hoffman DM, Girshick AR, Akeley K, Banks MS. (2008). Vergence accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 28;8(3): 33.1-30.
- Honda S, Fujii S, Sekiya Y, Yamamoto M. Retinal control on the axial length mediated by transforming growth factor-beta in chick eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1996;37:2519-26.
- Howard I. P. and Rogers B. J., *Depth perception*, Oxford Scholarship, 2008.
- Howarth PA. (2011). Potential hazards of viewing 3D stereoscopic television, cinema and computer games: a review. *Ophthalmic Physiol Opt*, 31(2): 111-22.
- Hubel D. H. and Wiesel T. N., "Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex," *Journal of Physiology*, vol. 148, no. 1, pp. 574–591, 1959.

Inserm, 2002, Expertise collective, Déficits visuels : Dépistage et prise en charge chez le jeune enfant.

Jainta S, Kapoula Z (2011) Dyslexic Children Are Confronted with Unstable Binocular Fixation while Reading. PLoS ONE 6(4): e18694. doi:10.1371/journal.pone.0018694.

Jandó, G. *et al*, 2012. Biological Sciences - Psychological and Cognitive Sciences - Social Sciences - Psychological and Cognitive Sciences, Early-onset binocularity in preterm infants reveals experience-dependent visual development in humans *PNAS* 2012 109 (27) 11049-11052.

Kapoula Z., Bucci M.P., 2007. Postural control in dyslexic and non-dyslexic children. *J Neurol*, 254: 1174-1183

Kapoula Z., Bucci M.P., Eggert T., Garraud L., 1997. Impairment of the binocular coordination of saccades in strabismus. *Vision Res*, 37: 2757-2766.

Kapoula Z., Bucci M.P., Jurion F., Ayoun J., Afkhami F., Bremond-Gignac D., 2007a. Evidence for frequent divergence impairment in French dyslexic children: deficit of vergence relaxation or of divergence per se? *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 245: 931-936.

Kapoula Z., Bucci M.P., Le T.T., Wiener-Vacher S., Bremond-Gignac D., 2007b. Syndrome pseudo vestibulaire, stabilité posturale et rôle de la vergence oculomotrice : étude des enfants, adultes et sujets âgés. *Journal d'Orthoptie*, 38: 37-53.

Kapoula Z., Bucci P., 2002. Distribution-dependent saccades in children with strabismus and in normals. *Exp Brain Res*, 143: 264-268.

Kapoula Z., Gaertner C., Matheron, E., Spherical lenses and prisms lead to postural instability in both dyslexic and non dyslexic adolescents. *Plos one*, 2012, 7(11).

Kapoula Z, Gaertner C, Yang Q, Denise P, Toupet M. Vergence and Standing, Balance in Subjects with Idiopathic Bilateral Loss of Vestibular Function. *PLoSOne*. 2013 Jun 18;8(6):e66652. Print 2013. PubMed PMID: 23825551; PubMed Central, PMCID: PMC3688965.

Kapoula Z., Ganem R., Poncet S., Gintautas D., Eggert T., Bremond-Gignac D., Bucci M.P., 2009. Free exploration of painting uncovers particularly loose yoking of saccades in dyslexics. *Dyslexia*, 15: 243-259.

Kapoula Z., Vernet M., Yang Q., Bucci M.P., 2008. Binocular coordination of saccades: development, aging and cerebral substrate. *Journal of Eye Movement Research*, 2: 1-20.

Kapoula Z., Yang Q., Vernet M., Bonfils P., Londero A., 2010b. Eye movement abnormalities in somatic tinnitus: fixation, smooth pursuit and optokinetic nystagmus. *Auris Nasus Larynx*, 37: 314-321.

Kato H., Bishop P. O., and Orban G. A., "Hypercomplex and simple/complex cell classifications in cat striate cortex," *Journal of Physiology*, vol. 41, no. 5, pp. 1071-1095, 1978.

Kauff, P., Atzpadin, N., Fehn, C., Müller, M., Schreer, O., Smolic, A. and Tanger, R. (2007). Depth Map Creation and Image-Based Rendering for Advanced 3DTV Services Providing Interoperability and Scalability, *Signal Processing: Image Communication*, 22 (2), 217-234.

Kim SH, Suh YW, Yun C, Yoo EJ, Yeom JH, Cho YA., Eye (Lond). Influence of stereopsis and abnormal binocular vision on ocular and systemic discomfort while watching 3D television. 2013 Nov;27(11):1243-8. doi: 10.1038/eye.2013.173. Epub 2013 Aug 9.

Kingdom FA. Color brings relief to human vision. *Nat Neurosci* 2003; 6:641-4. Krauskopf J, Forte JD. Influence of chromaticity on vernier and stereo acuity. *J Vis* 2002; 2:645-52.

- Kovacs P. T. and Balogh T, 3D Light-Field Display Technologies, in F. Dufaux, B. Pesquet-Popescu and M. Cagnazzo, editors, *Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering*, Wiley, 2013.
- Lambooy M., IJsselsteijn W., (2009) Visual discomfort in stereoscopic displays: a review. *Journal of Imaging Science and Technology* 53(3): 030201–030201-14, 2009. Society for Imaging Science and Technology 20.
- Leigh R.J., Zee D.S., 2006. *The neurology of eye movements (fourth edition)*. Oxford University Press, New-York Oxford.
- Leroy L., Fuchs P., Paljic A., Moreau G., Some experiments about shape perception in stereoscopic displays, IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, Number 7237-45, 18-22 January 2009, San Jose, California USA.
- Liu J, Pendrak K, Capehart C, Sugimoto R, Schmid GF, Stone RA. Emmetropisation under continuous but non-constant light in chicks. *Exp Eye Res.* 2004;79:719-28.
- Liu L, Stevenson SB, Schor CM. A polar coordinate system for describing binocular disparity. *Vision Res* 1994; 34:1205-22.
- MacAskill M.R., Anderson T.J., Jones R.D., 2002. Saccadic adaptation in neurological disorders. *Prog Brain Res*, 140: 417-431.
- Markham CH, Estes MS, Blanks RH. Vestibular influences on ocular accommodation in cats. *Int J Equilib Res* 1973; 3(1):102–15.
- Maske R, Yamane S, Bishop PO, 1986, Stereoscopic mechanisms: binocular responses of the striate cells of cats to moving light and dark bars, *Proc R Soc Lond B Biol Sci*.
- Matheron E., Kapoula Z., 2008. Vertical phoria and postural control in upright stance in healthy young subjects. *Clin Neurophysiol*, 119: 2314-2320.
- Matheron E., Kapoula Z., 2011. Vertical heterophoria and postural control in nonspecific chronic low back pain. *Plos One*.
- Matheron E., Le T.T., Yang Q., Kapoula Z., 2007. Effects of a two-diopter vertical prism on posture. *Neurosci Lett*, 423: 236-240.
- Matheron E., Yang Q., Le T.T., Kapoula Z., 2008. Effects of ocular dominance on the vertical vergence induced by a 2-diopter vertical prism during standing. *Neurosci Lett*, 444: 176-180.
- Matthews N, Meng X, Xu P, Qian N. A physiological theory of depth perception from vertical disparity. *Vision Res* 2003; 43:85-99.
- Mueller, K., Merkle, P., Tech, G. and Wiegand, T. (2010). *3D Video Formats and Coding Methods*. Proc. IEEE Int. Conf. in Image Processing, Hong Kong.
- Murata A., Uetake A., Otsuka W., and Takasawa Y. (2001), Proposal of an index to evaluate visual fatigue induced during visual display terminal tasks, *International journal of human computer interaction* 13: 305-321.
- NF X 50-110 (mai 2003) *Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise*. AFNOR (indice de classement X 50-110).
- Ohm, J.-R.; Sullivan, G.J. High Efficiency Video Coding: The next frontier in video compression, *IEEE Signal Processing Magazine* (2013), 30 (1), pp. 152-158.
- Ohzawa I. and Freeman R.D., “The binocular organization of simple cells in the cat’s visual cortex,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 56, pp. 221–242, 1986.

- Ohzawa I. and Freeman R.D., "The binocular organization of complex cells in the cat's visual cortex," *Journal of Neurophysiology*, vol. 56, pp. 243–259, 1986.
- Ohzawa I., De Angelis G. C., and Freeman R. D., "Neural encoding of binocular disparity : energy models, position shifts and phase shifts," *Vision Research*, vol. 75, pp. 1779–1805, 1996.
- Orssaud, C., *Vision binoculaire*. EMC (Elsevier SAS, Paris), *Ophthalmologie*, 21-545-A-25, 2006.
- Patel SS, Ukwade MT, Bedell HE, Sampath V. Near stereothresholds measured with random-dot stereograms using phase disparities. *Optometry* 2003; 74:453-62.
- Pigassou-Albouy, R. (2000), How and why we see "one" with two eyes?, *J Fr Ophtalmol*, 23 (9), 952-961.
- Prince SJ, Rogers BJ. Sensitivity to disparity corrugations in peripheral vision. *Vision Res* 1998; 38:2533-7.
- Rabbani, M. and Joshi, R. (2002). An Overview of the JPEG2000 Still Image Compression Standard, *Signal Processing: Image Communication*, 17 (1), 3-48.
- Rasengane, T.A., Allen, D., & Manny, R.E. (1997). Development of temporal contrast sensitivity in human infants. *Vision Res*, 37 (13), 1747-1754.
- Reading RW. A disparity analysis of some horopter data. *Am J Optom Physiol Opt* 1980; 57:815-21.
- Reim M, Teping C, Silny J., The development of stereoscopic vision in the first months of life, *J Fr Ophtalmol* 1989; 12:623-7.
- Rigaudière F., Delouvrier E., Le Gargasson J.-F., «VII-1 : MATURATION VISUELLE ET ÉLECTROPHYSIOLOGIE PÉDIATRIQUE», *Oeil et Physiologie dela Vision* [En ligne], VII-Electrophysiologie pédiatrique, mis à jour le : 12/04/2012, URL :<http://lodel.demo.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision/index.php?id=133>.
- Risse JF. Etude du champ visuel. In: Risse JF, ed. *Exploration de la fonction visuelle. Rapport de la SFO*. Paris: Masson, 1999:153-252.
- Scharstein, D. and Szeliski, R. (2002). A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms, *International Journal of Computer Vision*, 47 (1/2/3), 7-42.
- Sheedy J. E., Hayes J., and Engle J. (2003), Is all asthenopia the same?, *Optometry and vision science* **80**: 732-739.
- Shiple T, Rawlings SC. The nonius horopter. I. History and theory. *Vision Res* 1970; 10:1225-62.
- Slingsby C. Bax B. *Molecular Interactions of Crystallins in Relation to Optical Properties*. University of Oxford, Oxford (UK): Colin Blakemore.; 1989. (Presbyopia research.).
- Speranza F. and Wilcox L. M., "Viewing stereoscopic images comfortably: The effects of whole-field vertical disparity," in *Proc. Stereoscopic, Displays Virtual Reality Syst. IX*, 2002, vol. 4660, pp. 18–25.
- Teller DY. Scotopic vision, color vision, and stereopsis in infants. *Curr Eye Res*. 1982-1983;2:199-210.
- Trotter, Y., Celebrini, S., Durand, J.B., Evidence for implication of primate area V1 in neural 3-D spatial localization processing, (2004) *Journal of Physiology Paris*, 98 (1-3 SPEC. ISS.), pp. 125-134.
- Tychsen L. *Binocular vision. Adler's physiology of the eye*. St Louis: Mosby, 1992:773-853.

- Uetake A., Murata A., Otsuka M., and Takasawa Y. (2000), "Evaluation of visual fatigue during VDT tasks, Systems, Man, and Cybernetics", IEEE International Conference on systems, machines and cybernetics 2: 1277-1282.
- Vetro, A. (2010). Frame Compatible Formats for 3D Video Distribution. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing (ICIP), Hong Kong.
- Vetro, A., Tourapis, A.M., Müller, K. and Chen, T. (2011a). 3D-TV Content Storage and Transmission, IEEE Trans. on Broadcasting, 57 (2), 384-394.
- Vetro, A., Wiegand, T., and Sullivan, G. J. (2011b). Overview of the Stereo and Multiview Video Coding Extensions of the H.264.MPEG-4 AVC Standard, Proceedings of the IEEE, 99 (4), 626-642.
- Vital-Durand, F. (1983). New data on the visual system. 2: Development and plasticity of the visual pathway. J Fr Ophthalmol, 6 (3), 319-323.
- Ward PA, Charman WN. On the use of small artificial pupils to open-loop the accommodation system. Ophthalmic Physiol Opt 1987; 7(2):191-3.
- Wald G, Griffin DR. The change in refractive power of the human eye in dim and bright light. J Opt Soc Am 1947; 37(5):321-36.
- Westheimer G, Pettet MW. Detection and processing of vertical disparity by the human observer. Proc R Soc Lond B Biol Sci 1992; 250:243-7.
- Wiegand, T., Sullivan, G.J., Bjøntegaard, G. and Luthra, A. (2003). Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard, IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 13 (7), 560-576.
- Wiesel Tn, Hubel Dh. Effects of visual deprivation on morphology and physiology of cells in the cats lateral geniculate body. J Neurophysiol. 1963;26:978-93.
- Yang Q., Bucci M.P., Kapoula Z., 2002. The latency of saccades, vergence, and combined eye movements in children and in adults. Invest Ophthalmol Vis Sci, 43: 2939-2949.
- Yang Q., Jurion F., Bucci M.P., Lucek A., Wiener-Vacher S., Bremond-Gignac D., Orssaud C., Kapoula Z., 2008a. Six adult cases with a pseudo-vestibular syndrome related to vergence abnormalities. Neuro-Ophthalmology, 32: 93-104.
- Yang Q., Kapoula Z., 2003. Binocular coordination of saccades at far and at near in children and in adults. J Vis, 3: 554-561.
- Yang Q., Kapoula Z., 2006. The control of vertical saccades in aged subjects. Exp Brain Res, 171: 67-77.
- Yang Q., Kapoula Z., 2008. Aging does not affect the accuracy of vertical saccades nor the quality of their binocular coordination: a study of a special elderly group. Neurobiol Aging, 29: 622-638.
- Yang Q., Kapoula Z., Debay E., Coubard O., Orssaud C., Samson M., 2006. Prolongation of latency of horizontal saccades in elderly is distance and task specific. Vision Res, 46: 751-759.
- Yang Q., Kapoula Z., Vernet M., Bucci M.P., 2010a. Binocular coordination during smooth pursuit in dyslexia: a multiple case study. Journal of Eye Mov Res, 3: 1-8.
- Yang Q., Le T.T., Debay E., Orssaud C., Magnier G., Kapoula Z., 2008b. Rare express saccades in elderly fallers. Clinical Intervention on Aging, 3: 691-698.
- Yang Q., Le T.T., Kapoula Z., 2009a. Aging effects on the visually driven part of vergence movements. Invest Ophthalmol Vis Sci, 50: 1145-1151.

- Yang Q., Le T.T., Kapoula Z., 2009b. Different effects of aging on regular and express latencies of vergence. *Journal of Eye Movement Research*, 1(3): 1-12.
- Yang Q., Vernet M., Orssaud C., Bonfils P., Londero A., Kapoula Z., 2010b. Central crosstalk for somatic tinnitus: abnormal vergence eye movements. *PLoS One*, 5: e11845.
- Yano S., Emoto M., Mitsuhashi T. (2004) Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images *Displays*, 25 (4), pp. 141-150.
- Yuodelis C, Hendrickson A. A qualitative and quantitative analysis of the human fovea during development. *Vision Res.* 1986;26:847-55.
- Zitnick, C.L., Kang, S.B., Uyttendaele, M., Winder, S. and Szeliski, R. (2004). High-quality Video View Interpolation Using a Layered Representation. *ACM SIGGRAPH and ACM Trans. on Graphics*, Los Angeles, CA.

Glossaire³⁶

Accommodation : modification de la courbure du cristallin de l'œil, sous l'action des muscles ciliaires, afin de former sur la rétine une image nette des objets observés à des distances différentes.

Acuité binoculaire stéréoscopique : limite de résolution de la profondeur perçue par nos deux yeux. Représente la capacité à distinguer plusieurs plans de profondeur rapprochés, plans définis par des angles différents de parallaxe également très proches.

Aire de fusion de Panum : région virtuelle située autour de l'horoptère où les disparités rétinienne peuvent être fusionnées par le système visuel en une image tridimensionnelle. En dehors de cette région, la fusion n'est plus possible, les images semblent dédoublées (en réalité l'image gauche et l'image droite ne sont pas fusionnées) et l'on perçoit donc en diplopie.

Amblyopie : l'amblyopie oculaire est une pathologie fonctionnelle qui se caractérise par une réduction de l'acuité visuelle, non améliorable par correction optique et en dehors de toute anomalie organique des voies visuelles. Elle est due à un défaut d'apprentissage de la fonction visuelle.

Angle de parallaxe : angle partant du point de vergence observé par nos deux yeux et formant un triangle avec eux.

Auto-stéréoscopie : visualisation 3Ds sans lunette, à 2 points de vue.

Auto-multiscopie : visualisation 3Ds sans lunette, à N points de vue (N supérieur à 2).

Convergence : rotation des deux yeux (vergence binoculaire) ou de deux caméras, visant le même point de l'espace 3D.

Cristallin : lentille biconvexe de l'œil, derrière la pupille, participant à la vergence des rayons lumineux vers la rétine et réalisant la mise au point sur les objets observés, proches ou lointains.

Cross-talk : dissociation physique imparfaite des images destinées respectivement à l'œil gauche et à l'œil droit lors d'observation de contenus 3Ds sur un écran plano-stéréoscopique.

Diplopie : trouble de la vue caractérisé par une absence de fusion des images perçues par les deux yeux et provoquant une vision double de l'objet observé.

Disparité : distance entre les points homologues d'un même objet observés sur les images ou les rétines gauche et droite.

Disparité croisée : disparité rétinienne correspondant aux croisements des rayons optiques de chaque œil sur l'avant de l'horoptère, ou du plan de vergence.

Disparité non-croisée : disparité rétinienne correspondant aux croisements des rayons optiques de chaque œil en arrière de l'horoptère, ou du plan de vergence.

Disparité rétinienne : disparité entre points homologues d'un même objet formée sur la rétine de chaque œil.

Disparité angulaire : voir *angle de parallaxe*.

³⁶ Quelques définitions apparaissant dans ce glossaire sont issues, avec la permission de la Ficam, du « Livre blanc du relief (3Ds) », document réalisé sous l'égide de la Ficam, de l'UP3D, de la CST, du HD Forum et de l'AFC.

Distance interpupillaire : distance entre les pupilles de nos deux yeux. Généralement considérée par défaut pour un adulte mâle autour de 65 mm. La plage totale s'étend environ de 52 mm à 72 mm (enfant, adulte).

Dioptrie : unité de vergence homogène à l'inverse d'une longueur.

Dyscalculie spatiale : trouble se manifestant pas un non alignement des chiffres, une absence de représentation spatiale et mentale des chiffres.

Dysgraphie : trouble de l'écriture, écriture très pointue, lettres non formées et qui ne sont pas sur les lignes, ratures, lenteur.

Dyslexie : trouble spécifique de l'apprentissage de la lecture, lié à une difficulté particulière à identifier les lettres, les syllabes ou les mots.

Dyspraxie : défaut d'automatisation de la séquence gestuelle (de la bouche, des jambes, des mains et/ou des yeux).

Effet de jaillissement : dans le cas où la fenêtre stéréoscopique est présentée dans le plan de l'écran il s'agit d'un effet de relief où les objets sont perçus devant l'écran physique de diffusion. Cela correspond à une parallaxe négative.

Focalisation : opération qui consiste à concentrer les rayons lumineux provenant d'un point en un autre point.

Fusion stéréoscopique : phénomène qui combine au niveau du cerveau les vues provenant des deux yeux et qui permet la perception d'une unique image tridimensionnelle.

Horoptère : arc de cercle virtuel de notre environnement visuel formé par tous les points de vergence provenant de l'observation d'objets-points situés à la même distance de nos yeux. Tous les points situés sur cette courbe correspondent à des emplacements identiques sur les deux rétines. La disparité rétinienne est donc nulle sur cette courbe. La disparité des objets observés à l'intérieur de l'horoptère s'appelle « disparité croisée », celle des objets situés à l'extérieur s'appelle « disparité non-croisée ».

Interfaçage visuel : c'est le schéma qui regroupe l'observateur, l'interface visuelle et la perception 3D.

Parallaxe : décalage entre les positions apparentes d'un objet dû à l'écartement des yeux de l'observateur. C'est aussi l'écart entre les points homologues gauche et droit d'un même objet observé sur un écran plano-stéréoscopique. Cet écart est dû à l'écartement des points de vue de la scène observée.

Parallaxe négative : objets 3D perçus en avant de l'écran de diffusion (pour le système visuel rétinien on parle de « disparité croisée »).

Parallaxe positive : objets 3D perçus en arrière de l'écran de diffusion (pour le système visuel rétinien on parle de « disparité non-croisée »).

Parallaxe zéro : surface plane représentée physiquement par l'écran de diffusion et sur laquelle sont situés tous les points homologues gauche et droit confondus des objets de la scène.

Points homologues : points correspondants d'un même objet vus par l'œil gauche et par l'œil droit dont les écarts de distance affichés sur les rétines constituent la disparité rétinienne. Ces points correspondants du même objet sont aussi présents sur les images gauche et droite affichées sur le plan de l'écran de diffusion et dont les écarts de distance constituent la parallaxe.

Proprioceptif : qui se rapporte à la sensibilité du système nerveux aux informations provenant des muscles, des articulations et des os. La sensibilité proprioceptive complète les sensibilités intéroceptive (qui concerne les viscères), extéroceptive (qui concerne la peau) et celle des organes des sens. Elle permet d'avoir conscience de la position et des mouvements de chaque segment du

corps (position d'un doigt par rapport aux autres, par exemple) et donne au système nerveux, de façon inconsciente, les informations nécessaires à l'ajustement des contractions musculaires pour les mouvements et le maintien des postures et de l'équilibre.

Rivalité binoculaire : perception de différences entre vue gauche et vue droite notamment en asymétrie géométrique et colorimétrique.

Saccade : une saccade oculaire est un mouvement bref et rapide des yeux entre deux positions stables.

Stéréoacuité : capacité à détecter des (petites) différences de profondeur en utilisant les indices stéréoscopiques. La mesure de stéréoacuité détermine la plus petite disparité des images rétinienne engendrant une variation de profondeur perceptible. Elle est exprimée en secondes d'arc.

Stéréoscopie : principes et méthodes qui permettent l'observation et / ou la restitution de la vision binoculaire. Permet la création de couples d'images gauche et droite et la perception du relief en diffusion.

Stéréoscopie à l'infini : la distance la plus éloignée entre l'objet et l'observateur en vision binoculaire où l'effet de profondeur est encore discernable, habituellement estimée à 200 mètres.

Vergence : mouvement des deux yeux dans lequel les axes visuels cessent d'être parallèles ; ils peuvent se rapprocher (vergence) ou s'éloigner (divergence) de façon à ajuster l'angle des axes optiques en fonction de la profondeur de l'objet fixé. Il y a vergence pour un objet proche et il y a divergence pour un objet lointain.

ANNEXES

Annexe 1 : Les formats de vidéo 3Ds

Compte tenu de la variété des représentations vidéo 3Ds existantes, il est nécessaire d'examiner les formats de compression associés. Les trois formats normalisés les plus utilisés à ce jour sont le *simulcast*, le *Frame-Compatible*, et le *Multiview Video Coding (MVC)*.

Simulcast

Les 2 ou N vues d'une vidéo (stéréo ou multivue) peuvent être codées indépendamment l'une de l'autre. Cette solution présente l'avantage évident de simplicité. En outre, aucune synchronisation entre les vues n'est nécessaire.

Le *simulcast* présente un certain nombre d'avantages. Tout d'abord, un codeur vidéo standard peut être utilisé. En outre, il est facile de décoder une vue pour un affichage sur un écran monoscopique, garantissant ainsi la rétrocompatibilité. Enfin, la complexité et le délai sont réduits au minimum.

Toutefois, en raison du fait que la corrélation entre les caméras n'est pas exploitée, cette solution n'est pas optimale en matière de débit-distorsion.

Lorsque la bande passante n'est pas critique, la transmission *simulcast* est particulièrement adaptée. Cette solution est actuellement utilisée dans le cinéma stéréoscopique 3D qui est basé sur le format JPEG 2000 [Rabbani et Joshi, 2002]. Dans ce cas, les deux points de vue sont indépendamment codés et les redondances entre les vues gauche et droite ne sont pas exploitées.

Formats « *Frame-Compatible* » (FC)

Les formats « *Frame-Compatible* » (FC) consistent à sous-échantillonner et multiplexer les images des vues gauche et droite en une seule image ou une seule séquence d'images (Vetro, 2010). En conséquence, le nouveau flux résultant a le même nombre d'échantillons qu'une séquence vidéo monoscopique. Il peut donc être efficacement encodé avec une méthode de compression standard, telle que *Advanced Video Coding (AVC)* [Wiegand *et al.*, 2003].

Dans le cadre des formats FC, le multiplexage peut s'effectuer spatialement ou temporellement. Avec un multiplexage spatial, les images des vues gauche et droite sont d'abord sous-échantillonnées, puis combinées dans une image unique. Par exemple, les deux vues peuvent être décimées verticalement ou horizontalement, et arrangées dans des configurations côte-à-côte, comme illustré dans la Figure 49. Similairement, les données peuvent être entrelacées par colonne, par ligne ou en damier, selon les motifs de la Figure 50.

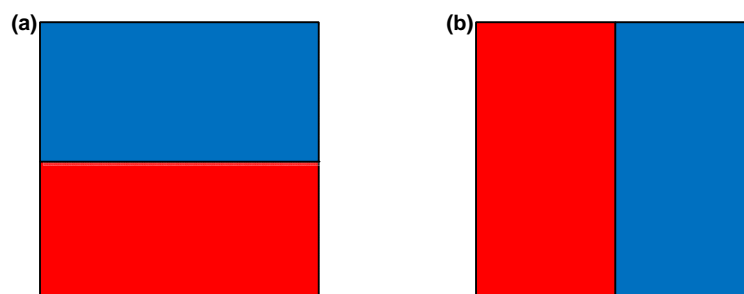


Figure 49 : formats FC côte-à-côte : a) haut-bas, b) gauche-droite.

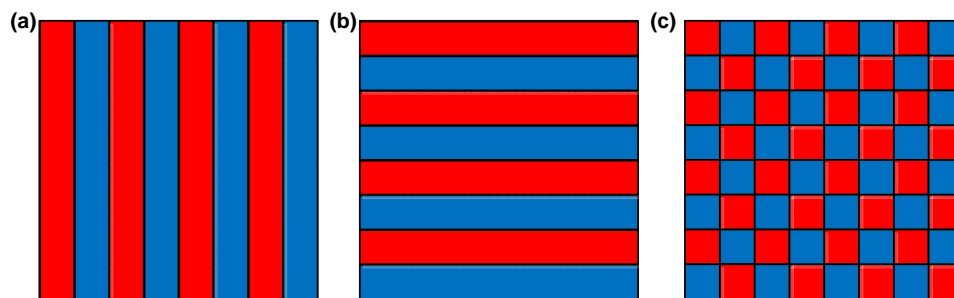


Figure 50 : formats FC entrelacés : a) par colonne, b) par ligne, c) en damier.

Avec un multiplexage temporel, les images des vues gauche et droite sont sous-échantillonnées et alternativement combinées en une seule séquence, comme indiqué dans la Figure 51.

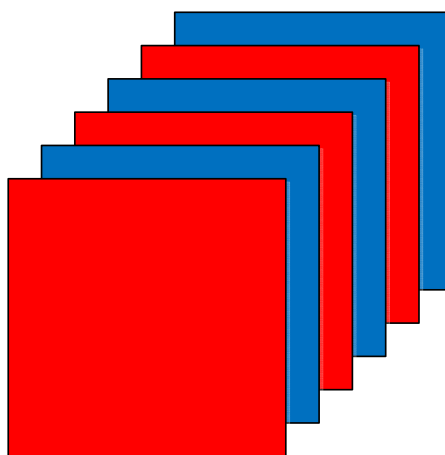


Figure 51 : format FC temporel.

Afin d'interpréter et de désentrelacer correctement les échantillons, les formats FC nécessitent une information auxiliaire. À cet effet, des messages « *Supplementary Enhancement Information* » (SEI) ont été normalisés dans le cadre de l'AVC.

Multiview Video Coding (MVC)

L'extension MVC [Vetro *et al.*, 2011b] de la norme AVC [Wiegand *et al.*, 2003] a été introduite en 2008 pour les représentations 3Ds et MVV.

Le format MVC permet d'encoder des vidéos multivues en maintenant autant que possible la structure même de l'AVC. En particulier, une compression efficace est obtenue en utilisant simplement des images de différents points de vue comme références de prédiction pour le bloc courant de pixels. Un exemple illustratif est donné en Figure 52. En conséquence, MVC profite ainsi de la structure flexible de prédiction AVC, et le flux MVC est très similaire à celui de l'AVC.

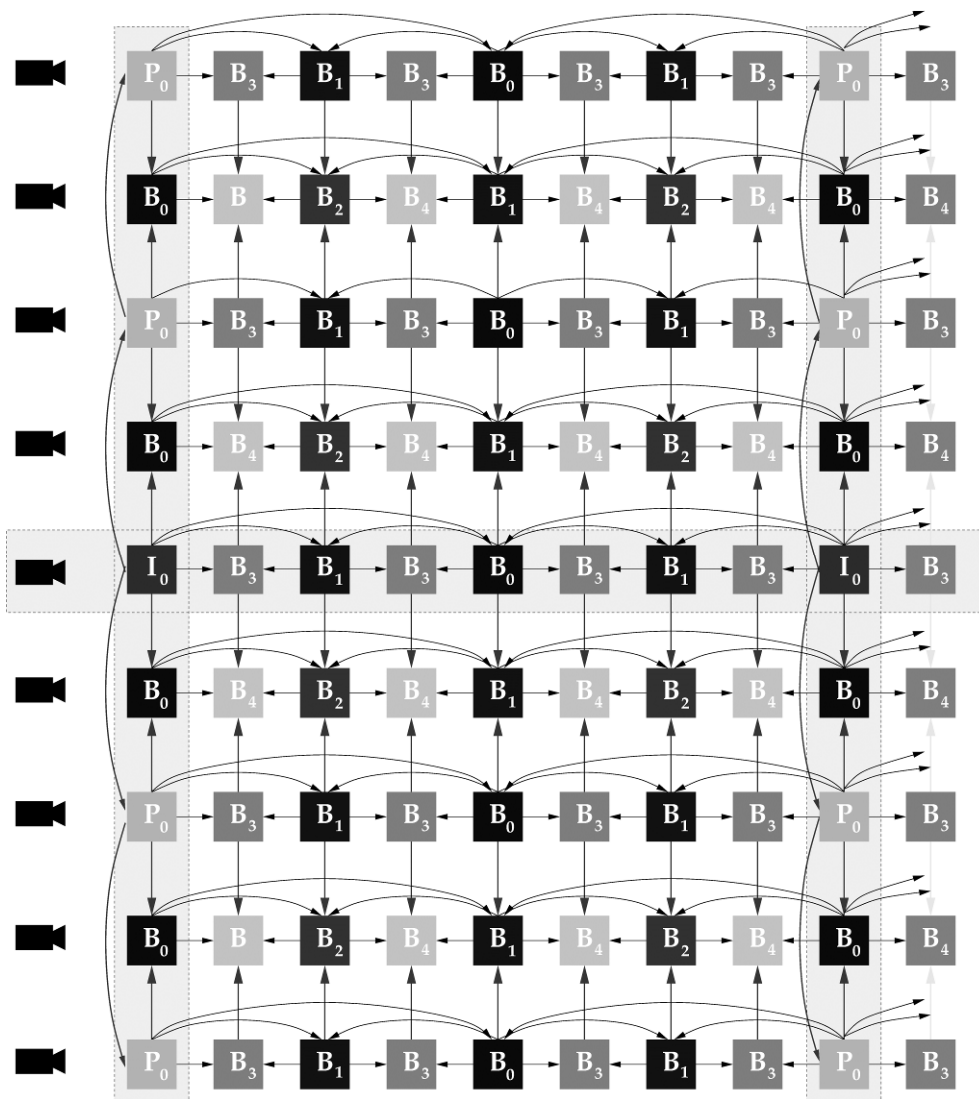


Figure 52 : schéma MVC (Multiview Video Coding).

MVC est particulièrement adapté pour les nouveaux écrans auto-stéréoscopiques qui nécessitent un grand nombre de points de vue. En outre, MVC permet de conserver la pleine résolution de la séquence vidéo et les difficultés associées à la synthèse de vue sont évitées. Enfin, la représentation peut facilement être compatible avec les écrans 2D existants par simple extraction de l'une des vues. L'inconvénient majeur de ce format est que le débit augmente linéairement avec le nombre de vues codées.

3D Video Coding (3DVC)

En vue d'améliorer les performances et d'accroître les fonctionnalités des normes actuelles, MPEG a récemment engagé une nouvelle phase de normalisation pour le codage vidéo 3D (3DVC).

Deux objectifs majeurs sont ciblés. D'une part, 3DVC vise un découplage du format vidéo et de la technologie d'affichage. En particulier, il inclut le support de techniques de traitement avancées afin d'ajuster la base de référence stéréoscopique, et donc de contrôler la perception de profondeur en fonction de l'environnement de visualisation. Cet élément est crucial afin de minimiser la fatigue visuelle et de maximiser l'expérience utilisateur. D'autre part, 3DVC doit également accommoder les écrans auto-stéréoscopiques multi-vues qui commencent à apparaître sur le marché. Plus précisément, 3DVC doit permettre la synthèse de nombreuses vues de haute qualité avec un débit binaire fortement contraint. À cet effet, 3DVC considère le codage de cartes de profondeur afin de découpler le débit binaire et le nombre de points de vue.

Trois voies sont actuellement poursuivies pour la normalisation. Dans une première approche, une extension rétrocompatible de *Multiview Video Coding* (MVC) [Vetro *et al.*, 2011b] est considérée. Plus particulièrement, un deuxième flux encode l'information de profondeur, indépendamment du flux représentant l'information de texture. La syntaxe de haut niveau est adaptée afin de signaler cette information supplémentaire, mais il n'y a aucun changement concernant la syntaxe ou le processus de décodage au niveau du macro-bloc.

Une deuxième approche envisage une extension rétrocompatible de AVC [Wiegand *et al.*, 2003]. Un flux vidéo de base encode l'information de texture d'une vue avec AVC. Pour les autres vues, ainsi que les cartes de profondeur, la syntaxe et le processus de décodage au niveau du macro-bloc sont modifiés afin d'améliorer l'efficacité de compression. Un bénéfice notable devra être établi pour justifier la normalisation de cette approche.

Finalement, une troisième approche développe une extension rétrocompatible de *High Efficiency Video Coding* (HEVC) [Ohm et Sullivan, 2013]. Dans un premier temps, une extension multi-vue simple de HEVC est envisagée, avec un schéma identique à MVC. Dans un deuxième temps, le codage de cartes de profondeur est considéré, ainsi que l'amélioration de la résolution des vues au moyen d'outils de codage avec scalabilité.

Annexe 2 : Compléments sur la physiologie de la vision

Anatomie de l'œil

L'œil comporte trois tuniques externes : la sclère, l'uvée et la rétine qui entourent trois milieux transparents internes, l'humeur aqueuse, le cristallin et l'humeur vitrée.

Ces trois tuniques sont constituées de dehors en dedans par :

- une tunique externe fibreuse, composée de la sclère, ou sclérotique, au niveau des trois quarts arrières de l'œil et de la cornée, transparente, dont le rayon de courbure est légèrement plus serré que celui de la sclère au niveau du quart antérieure de l'œil ;
- une tunique intermédiaire à prédominance vasculaire, l'uvée, composée de trois segments, en avant l'iris, diaphragme comportant deux muscles, le dilatateur et le sphincter, et contrôlant le diamètre d'un orifice percé en son centre, la pupille, au centre le corps ciliaire et en arrière la choroïde ;
- une tunique interne nerveuse, la rétine, constituée de 10 couches, qui capture les photons et les transforme en influx nerveux au niveau des photorécepteurs (cônes et bâtonnets) puis les transfèrent vers les fibres optiques constituant le nerf optique à travers un ensemble de cellules et de connexions intercellulaires régulatrices.

Les milieux transparents assurent le cheminement des rayons lumineux de la cornée à la rétine. Il s'agit :

- de l'humeur aqueuse, un liquide transparent qui remplit l'espace entre la cornée et le cristallin ;
- du cristallin, lentille dont la déformation permet l'accommodation ;
- du vitré (encore appelé corps vitré ou humeur vitrée), masse gélatineuse et transparente qui remplit l'ensemble de la cavité allant du cristallin à la rétine et qui occupe 60 % du volume oculaire.

Le corps ciliaire

Le corps ciliaire constitue le segment intermédiaire de l'uvée, située entre l'iris en avant et la choroïde en arrière. Cette structure annulaire fait saillie vers l'intérieur de l'œil. Elle a globalement la forme d'un triangle dont la base est dirigée vers l'iris. Il est habituel de lui décrire deux portions.

La portion postérieure du corps ciliaire est constituée par la *pars plana*. Cette portion lisse se continue en arrière par la choroïde en regard de l'ora serrata qui constitue la limite de la rétine visuelle à 10 couches.

La portion antérieure du corps ciliaire est plus importante d'un point de vue fonctionnel. À sa surface, il peut être observé une série d'élevures pyramidales gris clair, les procès ciliaires, sécrétant l'humeur aqueuse. Dans son épaisseur se trouve le muscle ciliaire constitué de deux contingents musculaires : le muscle de Brucke dont les fibres longitudinales sont tendues de la racine de l'iris à la choroïde et le muscle de Rouget-Muller dont les fibres sont circulaires. Ce muscle ciliaire permet l'accommodation en modulant la tension exercée sur le cristallin par l'intermédiaire des fibres zonulaires. Celles-ci sont tendues du cristallin à la face interne du corps ciliaire.

Le cristallin

Le cristallin est une lentille biconvexe transparente, ni innervée ni vascularisée, située entre l'iris et le vitré. Il est amarré au corps ciliaire et maintenu en place par les fibres de la zonule. La zonule

est le « système d'amarrage » du cristallin. Elle constitue un ensemble de fibres radiées formant un triangle à sommet ciliaire (au niveau des procès ciliaires) et à base cristallinienne. Ces fibres, très entrecroisées, avec de multiples faisceaux, transmettent au cristallin les contractions du muscle ciliaire.

La principale propriété du cristallin réside en sa capacité à se déformer en fonction des tractions qu'exerce sur lui le muscle ciliaire. Les modifications de contraction de ce muscle ciliaire entraînent des variations des rayons de courbure du cristallin. Il en résulte des changements du pouvoir de focalisation de l'œil : l'objet focalisant sur la rétine peut ainsi se trouver à des distances variables. C'est l'accommodation.

La rétine

La rétine est la membrane la plus interne de l'œil. Ce tissu d'origine neuro ectodermique comporte deux feuillets : la rétine neurale et l'épithélium pigmentaire rétinien séparés par un espace virtuel. La rétine visuelle s'étend de la papille jusqu'à l'ora serrata en périphérie. Elle est constituée de 10 couches. Les quatre couches les plus externes sont dites « réceptrices », les 6 suivantes, plus internes sont dites « transmettrices ». Elles assurent également une première analyse du message visuel, notamment au niveau des couches plexiformes externes, (couche des synapses entre photorécepteurs, cellules inter-plexiformes, cellules horizontales et cellules bipolaires qui modulent la taille des champs récepteurs de ces dernières) et interne (couche des synapses entre cellules bipolaires, cellules inter-plexiformes, cellules amacrines et cellules ganglionnaires).

En nasal du pôle postérieur de l'œil, légèrement en dessous du méridien horizontal, il existe un disque discrètement ovoïde à grand axe vertical d'où émergent les artères et veines rétiniennes. Cette zone constitue la papille ou tête du nerf optique. Elle ne comporte aucune cellule photoréceptrice.

Le pôle postérieur de l'œil correspond à la région maculaire, région particulière de la rétine, tant d'un point de vue fonctionnel qu'histologique. Cette région maculaire est centrée par une zone avasculaire, la fovéola, dont la coloration peut être légèrement différente de celle du reste de la rétine du fait d'un pigment jaunâtre. Pour comprendre l'importance de cette région rétinienne dans la physiologie de la vision et de la vision binoculaire, il faut d'abord évoquer la répartition des photorécepteurs au niveau rétinien.

Les photorécepteurs

Les photorécepteurs sont les cellules chargées d'assurer la transformation de l'énergie lumineuse, qui arrive sous forme de photons, en influx nerveux. Cette transformation, appelée « la cascade de la transduction visuelle » ou phototransduction, s'effectue au niveau de leurs segments externes, où se trouvent les pigments visuels. Ceux-ci sont constitués d'une protéine, la rhodopsine pour les bâtonnets et des iodopsines différents pour chacun des trois types de cônes et d'un chromophore, le 11-cis-rétinal. Ces pigments confèrent des propriétés spécifiques à chaque type de photorécepteur. La transduction visuelle suit des mécanismes proches quel que soit le type de photorécepteur. Celle-ci aboutit à une hyperpolarisation graduée en fonction de l'intensité lumineuse au niveau de l'ensemble du photorécepteur et au départ d'un potentiel d'action lorsqu'un seuil est atteint. Cette cascade de la transduction visuelle est associée à une forte consommation énergétique.

Il faut noter que les photorécepteurs, et plus encore leurs segments externes, sont localisés à la partie externe de la rétine. La lumière doit donc traverser, outre les milieux transparents de l'œil, toute l'épaisseur de la rétine avant de les atteindre. Enfin, la forme des segments externes permet de reconnaître les cônes, les moins nombreux (6 millions par rétine), et les bâtonnets (120 millions par rétine).

Les cônes

Les cônes sont présents sur l'ensemble de la surface rétinienne, mais leur répartition n'y est pas homogène. Ils sont particulièrement nombreux au niveau de la fovéola, portion centrale de la

macula, puis leur densité décroît jusqu'à l'ora serrata. Les cônes assurent la vision diurne. Ils peuvent néanmoins détecter des objets à de faibles luminances après des phénomènes d'adaptation auxquels participent les cellules horizontales. Dans la région maculaire, les cônes participent à la vision fine de par leur répartition histologique et leurs connexions particulières avec les cellules bipolaires. Par contre, en périphérie, ils permettent de détecter le mouvement d'objets arrivant dans le champ visuel.

Il existe trois types de cônes qui diffèrent par leur opsine et donc le pic d'absorption de leur pigment visuel. Les cônes ont tous une répartition identique, en dehors des cônes sensibles aux courtes longueurs d'onde qui prédominent dans la région juxta fovéolaire.

Les bâtonnets

Les bâtonnets sont absents de la région fovéale. Par contre leur densité est maximale en moyenne périphérie pour décroître par la suite vers la périphérie rétinienne. Ces cellules répondent pour des gammes de luminance très faibles allant de la pénombre à la vision nocturne. Par contre, leur pigment est entièrement dégradé en ambiance photopique. Ces cellules, qui ont une grande sensibilité, ne permettent pas une analyse du sens chromatique.

Les cellules bipolaires et la notion de champ récepteur

Les photorécepteurs s'articulent au niveau de la couche plexiforme externe avec différents types de cellules qu'il faut présenter. Les cellules horizontales connectent plusieurs photorécepteurs et participent au recrutement d'un nombre plus ou moins important de ceux-ci en fonction de l'excentration rétinienne et de la luminance de fond. Ils permettent ainsi de moduler la taille des champs récepteurs associés à chaque cellule bipolaire.

Les cellules bipolaires constituent le premier neurone de la voie visuelle. Elles reçoivent les influx nerveux d'un nombre plus ou moins important de photorécepteurs. Il est donc possible de définir le champ récepteur de chaque cellule bipolaire. Ces champs récepteurs correspondent à la portion de l'espace dans laquelle doit se trouver une stimulation visuelle pour entraîner une activité de la cellule bipolaire. À ce niveau de la voie optique, ils sont circulaires, chevauchants et comportent un centre et une périphérie dont la stimulation entraîne des réponses inverses. Il existe des cellules bipolaires « à centre *ON* » (et périphérie *OFF*) dont la fréquence de décharge augmente quand un *stimulus* est projeté au niveau de la région centrale du champ récepteur alors qu'elle diminue quand ce *stimulus* arrive au niveau de la périphérie du champ récepteur. Ce schéma de réponse est inversé pour les cellules bipolaires « à centre *OFF* » (et périphérie *ON*). D'autres cellules bipolaires codent le sens chromatique et sont alors « à centre rouge » (et périphérie verte) ou l'inverse. Cette notion de champ récepteur se prolonge tout au long de la voie optique ainsi qu'au niveau du cortex visuel. Ils permettent de faire concentrer le message perçu par 123 millions de photo-récepteurs sur un million de cellules ganglionnaires au niveau du nerf optique.

Plus le nombre de photorécepteurs connectés à une même cellule bipolaire est élevé, plus son champ récepteur est grand et moins elle véhicule une vision fine. Le diamètre des champs récepteurs augmente depuis la fovéa vers la périphérie. Tel est le cas en périphérie rétinienne où l'acuité visuelle est faible, les photorécepteurs ne détectant que les objets en mouvement.

La macula

La macula est une zone particulière de la rétine, tant d'un point de vue fonctionnel et histologique que du fait des connexions que les différentes cellules contractent entre-elles. Elle correspond à la région au niveau de laquelle se projette l'axe visuel de l'œil, passant par le sommet de sa cornée et son centre de rotation.

La région maculaire ne recouvre qu'une zone de 5,5 mm de diamètre. Sa partie centrale, la fovéa, centrée par la fovéola, permet la détection la plus fine, associée à la meilleure acuité visuelle, colorée et en ambiance diurne. Cette capacité est due à la structure histologique de la rétine dans cette portion centrale. À ce niveau, les photo-récepteurs sont uniquement des cônes. De plus, pour limiter les structures que les photons doivent traverser avant d'atteindre les articles externes de

ces cônes, toutes les autres couches rétiniennes sont rejetées en périphérie maculaire. C'est pourquoi l'épaisseur de la fovéa est réduite à 130 μm alors qu'elle est de 400 - 500 μm là où les couches sont rejetées. Enfin, la taille des champs récepteurs est réduit, chaque cône est connecté à deux cellules bipolaires, l'une à centre *ON*, l'autre à centre *OFF*, assurant ainsi une vision fine.

La vision périphérique

Elle est assurée par les cônes et les bâtonnets présents à ce niveau de la rétine. La taille des champs récepteurs augmente de la macula vers la périphérie. À ce niveau, les cellules bipolaires périphériques reçoivent des influx d'un plus grand nombre de photorécepteurs. C'est pourquoi l'information visuelle véhiculée ne correspond pas à une vision fine mais à la détection des formes et plus encore du mouvement.

Conclusion

La différence dans le type d'information visuelle transmise dépend donc moins des photorécepteurs mis en jeu que des connexions neuronales au sein de la rétine. Elle est majorée par les spécificités des fibres optiques véhiculant les influx nerveux provenant de différents territoires rétiniens. À noter la diminution du nombre d'informations élémentaires transmises de la rétine (126 millions environ) à un million environ à l'aire V1 par le nerf optique.

Annexe 3 : Bases cérébrales du système visuel

La voie optique

L'information visuelle est véhiculée de la rétine au cortex cérébral au niveau duquel elle est analysée. Cette transmission met en jeu trois neurones successifs : les cellules bipolaires, les cellules ganglionnaires et les neurones des radiations optiques.

Les cellules ganglionnaires

Ces cellules font suite aux cellules bipolaires au niveau de la couche plexiforme interne de la rétine. Elles se réunissent au niveau de la papille optique pour former le nerf optique. Ces fibres se terminent au niveau d'un relais, le corps genouillé latéral (CGL), situé à la face latérale du mésencéphale. Les fibres provenant de la rétine temporale ne croisent pas la ligne médiane au niveau du chiasma optique et se dirigent vers le CGL homolatéral alors que les fibres optiques en provenance de la rétine nasale passent la ligne médiane et se dirigent vers le CGL controlatéral.

Il existe plusieurs types de cellules ganglionnaires véhiculant des informations visuelles spécifiques. Ces différences sont à l'origine des voies dites parvocellulaires ou magnocellulaires. Les cellules ganglionnaires répondent à des *stimuli* intéressant des champs récepteurs circulaires ayant une opposition *ON* – *OFF* entre le centre et la périphérie.

La voie magnocellulaire (M) est composée de cellules ganglionnaires de grande taille à grands champs récepteurs. Ces cellules M représentent environ 5 % de l'ensemble des cellules ganglionnaires et ne reçoivent pas d'influx provenant de cônes maculaires. Leur vitesse de conduction des potentiels d'action est élevée. Elles répondent à une stimulation par une brève salve de potentiels d'action et sont sensibles aux contrastes de luminance entre la partie sombre et la partie brillante du *stimulus*. On admet que cette voie magnocellulaire transmet des informations concernant la détection du mouvement des *stimuli*.

La voie parvocellulaire (P) est composée de cellules ganglionnaires de petite taille et représente environ 90 % de l'ensemble de ces cellules. Elles ont une vitesse de conduction lente. Ces cellules ont des champs récepteurs à opposition simple de couleur entre leur centre et leur périphérie (rouge / vert et bleu / jaune). Elles répondent de manière tonique tant que le *stimulus* est présent. Cette voie parvocellulaire participerait à la détection des formes et à la vision fine.

Il existe une voie non M – non P représentant environ 5 % de l'ensemble des cellules ganglionnaires et participant au sens chromatique.

Le corps genouillé latéral

Cette structure relais de la voie visuelle est accolée à la face latérale du mésencéphale. Elle comporte six couches contenant les corps cellulaires des neurones séparées par des couches de passage des axones. Les couches 1 et 2 appartiennent à la voie M tandis que les couches 3 à 6 reçoivent la voie P. Les informations visuelles restent monoculaires à ce niveau, puisque celles provenant de l'œil ipsilatéral projettent sur les couches 2, 3 et 5 du CGL tandis que celles issues de l'œil controlatéral arrivent au niveau des couches 1, 4 et 6.

Le cortex cérébral

Toutes les informations visuelles en provenance du CGL arrivent, par les rayonnements optiques, au niveau de la couche externe du cerveau dans une région appelée « aire visuelle primaire » ou aire V1. Celle-ci est située à la partie inféro-interne du lobe occipital et se prolonge au pôle dorsal de celui-ci (Figure 53). Chaque aire V1 reçoit des informations « monoculaires » provenant de l'hémi-rétine de chaque œil regardant l'hémi-champ visuel opposé. Ces informations deviennent binoculaires dans les différentes couches de l'aire V1 puis sont dispatchées dans les aires visuelles secondaires au niveau desquelles le message visuel est analysé. Ces aires traitent le

message selon deux grandes voies, celle du « où » qui s'intéresse à la localisation et au mouvement du *stimulus* et celle du « quoi » qui s'occupe de la forme du *stimulus*.

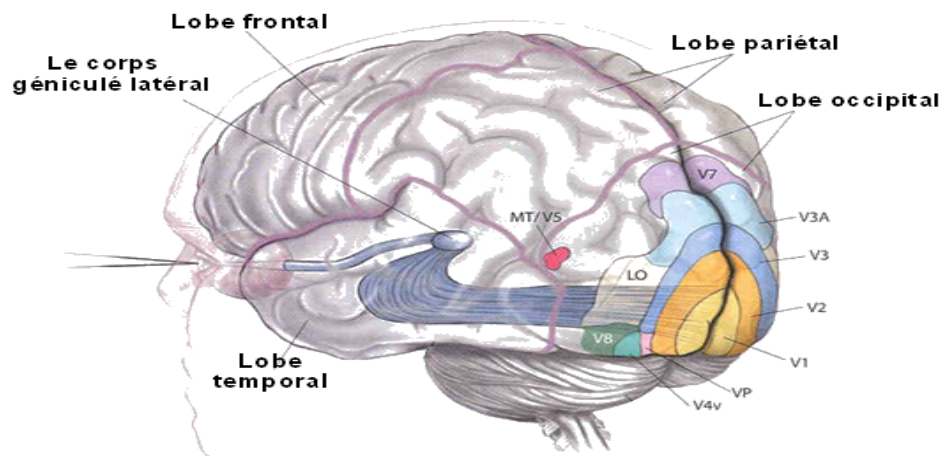


Figure 53 : cortex visuel primaire et aires visuelles secondaires

Structurellement, l'aire visuelle primaire est subdivisée en six couches comme l'ensemble du cortex cérébral. Mais la couche IV est divisée par une strie spécifique (d'où le nom de cortex strié ou aire striée donné également à l'aire V1). Le cortex strié est structuré d'une part en colonnes de dominances oculaires juxtaposées ne recevant des informations que d'un même œil et d'autre part en colonnes d'orientation de déplacement du *stimulus*. Ce système d'hypercolonnes est perpendiculaire à la surface du cortex et concerne donc l'ensemble des couches corticales en même temps. Au sein de ce système, il est retrouvé des « *blobs* » ou « *tâches* » sensibles aux couleurs.

La voie M, spécialisée dans l'analyse du mouvement, se termine de manière monoculaire dans les neurones de la couche IV C α de l'aire V1. Les champs récepteurs de ces neurones ne sont plus circulaires mais allongés. Ces neurones projettent sur les neurones de la couche IV B. Ceux-ci répondent donc à des stimulations des deux yeux. C'est à ce niveau que débute la vision binoculaire.

La voie P dite « *interblob* » (car ne se terminant pas dans les *blobs*), spécialisée dans l'analyse de la forme des objets, se termine dans la couche IV C β . Les neurones de cette couche restent monoculaires et ont des champs récepteurs circulaires de petite taille ayant une opposition rouge-vert entre le centre et la périphérie. Les neurones de cette couche IV C β projettent sur la couche III où débute le travail aboutissant à la vision binoculaire.

La voie non M – non P sensible au sens chromatique se termine au niveau des *blobs* de la couche III. Les informations visuelles sont monoculaires à ce niveau.

Les neurones du cortex visuel primaire V1 ont été classés en cellules simples, complexes et hypercomplexes par Hubel et Wiesel [Hubel et Wiesel, 1959] en fonction de la taille et de la forme de leur champ récepteurs, c'est-à-dire la portion d'espace dans laquelle doit se trouver une stimulation visuelle pour entraîner une activité du neurone. Ces neurones simples et complexes se retrouvent également au niveau de l'aire secondaire V2, ou dans des aires secondaires plus spécifiques pour les cellules hypercomplexes.

Chaque cellule « voit » plus que celles de niveau inférieur et les cellules les plus hautes ont le pouvoir d'abstraction le plus élevé. Ce dernier est généré par la connectivité neuronale à chaque relais des voies visuelles jusqu'aux différents cortex visuels.

La structure et la forme des champs récepteurs des cellules simples ont été suggérées pour la première fois par Hubel et Wiesel [Hubel et Wiesel, 1959] à la fin des années 1950. Les champs

récepteurs de ces cellules ont initialement été considérés comme des filtres spatiaux linéaires [Campbell *et al.*, 1969] caractérisés par leur forme allongée. Ils sont composés de deux régions antagonistes distinctes (*ON* et *OFF*) provenant des champs récepteurs respectivement activées et inhibées des cellules ganglionnaires. Comme l'illustre la Figure 54, pour déclencher une réponse maximale d'une cellule simple, le *stimulus* doit avoir la bonne orientation, la bonne position et la bonne taille. Les cellules simples sont ainsi sélectives à l'orientation de contours et très sensibles à la position du *stimulus*. Les champs récepteurs d'une cellule simple sont composés de sous-régions en opposition exerçant soit une influence excitatrice sur la réponse globale de la cellule, soit une influence inhibitrice. Le *stimulus* génère une réponse d'autant plus importante de cette cellule simple (ligne du bas) qu'il est parallèle et inclus dans la région d'excitation (blanche). Par contre, sa présence dans les régions inhibitrices (grise) a une action inhibitrice.

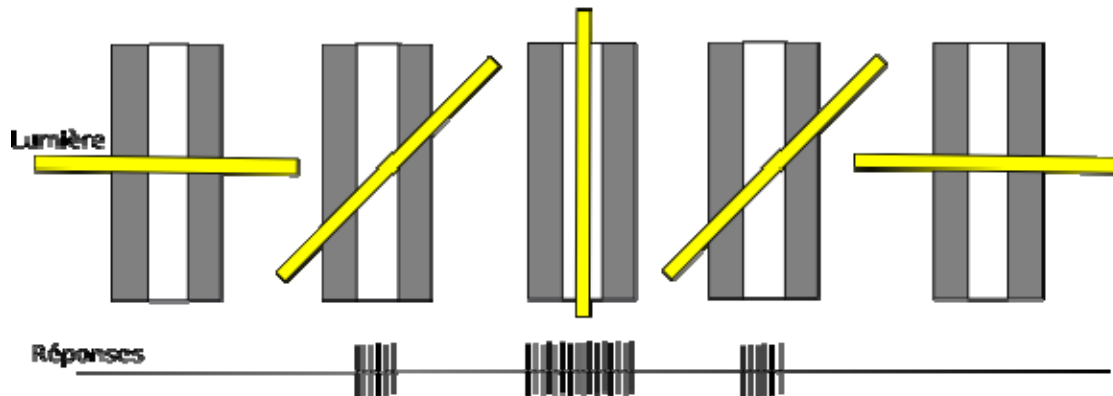


Figure 54 : champ récepteur d'une cellule simple

Comme la perception binoculaire est le résultat d'une fusion de deux informations monoculaires générées par les deux rétines, deux types de cellules simples sont retrouvées au niveau du cortex. Il existe d'une part des cellules simples monoculaires possédant des champs récepteurs de type monoculaire et qui récupèrent l'information monoculaire représentant l'information occultée dans une des rétines, et d'autre part des cellules simples binoculaires qui possèdent deux champs récepteurs, un pour chaque rétine. Ces dernières reçoivent donc l'information monoculaire générée par la rétine de gauche et la rétine de droite. Certaines cellules simples binoculaires répondent de manière linéaire avec sommation des deux yeux. Par contre, une réponse *ON* d'un œil et *OFF* de l'autre réduit la réponse de ces cellules simples (Figure 55). La première hypothèse concernant le traitement du signal par ces cellules simples était basée sur l'apparence de leur champ récepteur, c'est-à-dire leur similitude avec des bords ou des contours rencontrés dans l'environnement.

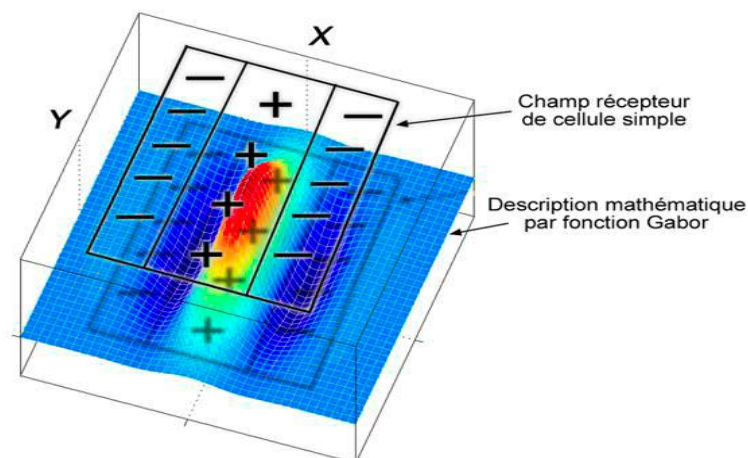


Figure 55 : champ récepteur d'une cellule simple à orientation verticale

Dans le modèle proposé par Ohzawa *et al.* [Ohzawa *et al.*, 1986], les champs récepteurs de deux cellules simples présentent une énergie binoculaire maximale lorsque les *stimuli* sont en exacte correspondance par l'absence de disparité. Dans le cas où les champs récepteurs correspondants présentent une disparité non nulle, les régions *ON* et *OFF* de chaque cellule ne sont pas en concordance et la réponse globale est réduite.

Barlow *et al.* [Barlow *et al.*, 1967] ont été les premiers à démontrer qu'un certain nombre de cellules simples binoculaires ont des réponses qui dépendent de la disparité binoculaire. Elles répondent préférentiellement lorsqu'un décalage (disparité) est introduit entre les *stimuli* des deux yeux. Enfin, les réponses de ces cellules dépendent également du type de *stimulus* utilisé [Maske *et al.*, 1986].

La seconde théorie s'appuie sur différentes analyses spatio-fréquentielles locales fondées sur des principes généralement applicables au traitement du signal. Mais il apparaît que ce modèle n'explique pas tous les types de réponses observées, puisque les interactions binoculaires ne dépendent pas uniquement de la disparité mais également de la position et/ou de la phase de chaque *stimulus* monoculaire. Anzai a proposé un modèle selon lequel le signal binoculaire est d'abord linéaire mais subit une interaction non linéaire, avec un facteur multiplicatif au niveau des cellules simples. Fleet et ses collaborateurs [Fleet *et al.*, 1996] ont modélisé cette réponse des cellules simples qui correspond au carré de la somme des activations monoculaires. Ainsi, la réponse des cellules simples dans le traitement initial des mécanismes de vision binoculaire et stéréoscopique est mathématiquement équivalente à une corrélation croisée entre les images monoculaires filtrées par les deux champs récepteurs.

Les cellules complexes constituent un niveau élevé dans le traitement de l'information [Kato *et al.*, 1978]. Elles constituent la population cellulaire la plus importante dans l'aire V1 puisqu'elles représenteraient 75 % des cellules corticales. Après Hubel et Wiesel, plusieurs travaux ont montré que ces cellules complexes recevaient leurs afférences de plusieurs cellules simples [Ohzawa and Freeman, 1986]. Comme les cellules simples, il existe deux types de cellules complexes : d'une part des cellules complexes monoculaires dont les champs récepteurs reçoivent les signaux de deux cellules simples monoculaires appartenant à la même rétine, afin de calculer le signal monoculaire correspondant aux régions perçues et d'autre part des cellules complexes binoculaires dont les champs récepteurs reçoivent les signaux de deux cellules simples binoculaires afin de générer un signal binoculaire.

Comme les cellules simples, les cellules complexes présentent un certain degré de sélectivité à l'orientation et répondent préférentiellement aux *stimuli* convenablement orientés. Mais les champs récepteurs des cellules complexes ne présentent pas de région antagoniste *ON* et *OFF*, ce qui les rend moins sensibles à la position du *stimulus*. C'est pourquoi elles répondent à des *stimuli* correctement orientés quelle que soit leur localisation dans le champ récepteur. De plus, la sélectivité d'orientation n'est pas le seul paramètre modifiant l'intensité de la réponse de ces cellules complexes. Cette réponse dépend également de la disparité binoculaire, de la fréquence spatiale du *stimulus* et de la direction du mouvement. Les cellules complexes ne réagissent que lorsque le *stimulus* se déplace dans une direction perpendiculaire à l'orientation du *stimulus* (Figure 56). Le *stimulus* génère une réponse d'autant plus importante (ligne du bas) qu'il se déplace en suivant un mouvement perpendiculaire au *stimulus*.

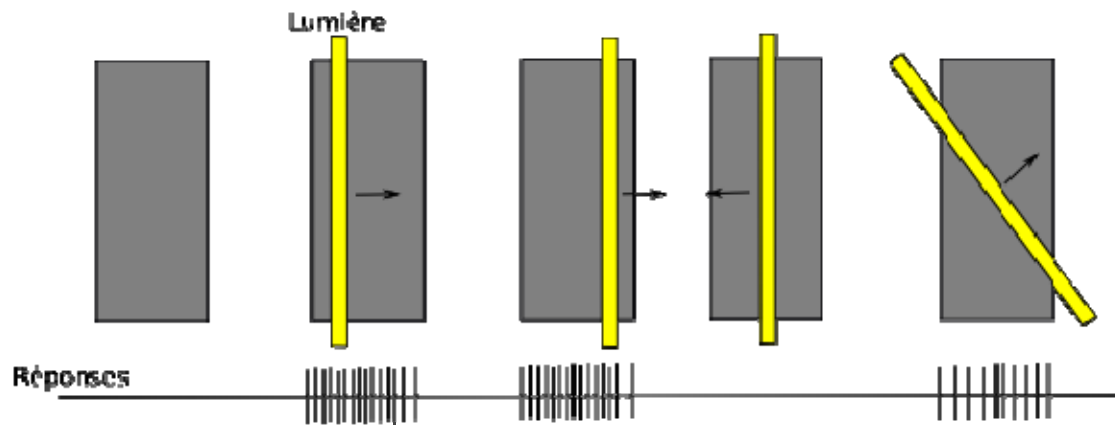


Figure 56 : champ récepteur d'une cellule complexe

Plusieurs solutions ont été proposées afin de modéliser le comportement des cellules complexes [Ohzawa et Freeman, 1986], [Blake et Wilson, 1994]. Dans le modèle de Fleet *et al.* [Fleet *et al.*, 1996], la cellule complexe hérite des propriétés des cellules simples qui projettent sur elle, à l'exception de la sensibilité à l'orientation et de l'agencement des régions *ON OFF*. Cette différence est due, dans ce modèle mathématique, au carré de la somme des activations dans une paire de cellules simples. Par contre, les cellules complexes restent sensibles à l'orientation du mouvement qui doit être perpendiculaire au *stimulus*. La réponse binoculaire qui résulte de la mise en jeu de ces cellules complexes dépend de la disparité positionnelle et de la différence de phase existant entre les paires de cellules simples qui lui envoient leurs informations.

De même que pour les cellules simples, la réponse de ces cellules complexes a été modélisée. Comme ces dernières, cette réponse subit également un facteur multiplicatif. Anzai estime que ces cellules complexes travaillent sur un équivalent de corrélation croisée interoculaire des images monoculaires d'une région spécifique de l'espace.

Les cellules hypercomplexes constituent un niveau encore plus élevé dans le traitement de l'information. Elles sont retrouvées principalement dans l'aire secondaire V5 (ou MT). Ces cellules sont sensibles au rapport entre la surface de leur champ récepteur et celle du *stimulus* ainsi qu'à un certain degré d'orientation du *stimulus* en mouvement. Certaines de ces cellules hypercomplexes ne sont également sensibles qu'à des lignes de longueur définie, de sorte que l'allongement du *stimulus* au-delà de cette limite réduit la réponse. Les cellules hypercomplexes reçoivent la convergence de plusieurs cellules complexes d'orientations différentes et de champs visuels voisins. Elles constituent encore un autre niveau de traitement de l'information.

Annexe 4 : Éléments sur le marché des technologies 3Ds

L'ensemble des éléments présentés dans cette annexe ont été transmis par la Ficam et le consortium « 3D Consumer ». Ces données sont issues d'un rapport de la société *Insight Média* datant de 2007 intitulé « *3D Technology and Markets: A Study of All Aspects of Electronic 3D Systems, Applications and Markets* ».

En 2007, c'est au cinéma que les technologies 3Ds sont le plus exploitées. La Figure 57 ci-dessous présente un état des lieux du nombre de salles de cinéma monoscopique et stéréoscopique dans différents pays en 2007. 25 % des salles de cinéma à travers le monde possédaient la technologie leur permettant de diffuser des films en 3Ds en 2007. Les marchés à fort potentiel sont les États-Unis, le Brésil, la Russie, l'Inde et la Chine.

	Digital Cinema		Digital 3D		3D as a % of total	
	Screens	Sites	Screens	Sites	Screens	Sites
UK	3576	681	1952	517	55%	76%
France	4363	1294	2662	1020	61%	79%
Italy	1877	624	1133	533	60%	85%
Germany	2486	779	1583	665	64%	85%
Spain	1753	415	935	355	53%	86%
EU	22 150	6 786	13 711	5 602	62%	83%
Middle East & Africa	1189	398	869	359	73%	90%
EMEA	23 339	7 184	14 580	5 961	62%	83%
US	29451	3366	13191	3007	45%	89%
Canada	2527	398	1057	344	42%	86%
North America	32 054	3 798	14 312	3 384	45%	89%
Australia & NZ	1564	370	873	296	56%	80%
China	9875	2408	3787	1573	38%	65%
Japan	2590	414	1289	375	50%	91%
S Korea	1834	295	641	239	35%	81%
APAC (Inc India & ANZ)	18 719	4 345	8 643	3 215	46%	74%
Mexico	2 109	491	1 224	476	58%	97%
Brazil	656	327	573	306	87%	94%
Argentina	183	102	171	98	93%	96%
LAM	3 711	1 285	2 658	1 223	72%	95%
Total	77 823	16 612	40 193	13 783	52%	83%

Figure 57 : état des lieux du nombre de salles de cinéma monoscopique (*Digital cinema*) et stéréoscopique (*Digital 3D*) en 2007

La Figure 58 présente le nombre de films 3Ds sortis au cinéma de 2005 à 2013 (estimation pour les années 2012 et 2013). Il y a eu une forte augmentation du nombre de films en 3Ds à la suite de la sortie du film *Avatar* en 2009. On note ensuite un ralentissement du marché, qui serait éventuellement lié à la mauvaise qualité 3Ds des films produits.

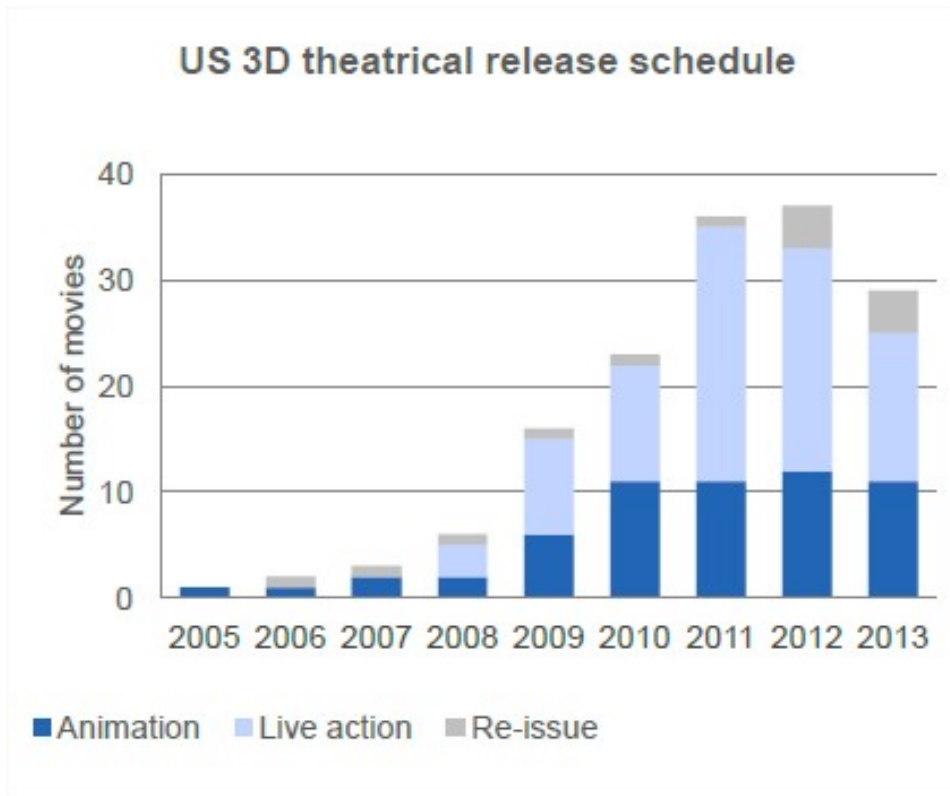


Figure 58 : nombre de films en 3Ds pour chaque année de 2005 à 2013

Annexe 5 : Auto-saisine



2011 -SA- 0 3 3 4

Maisons-Alfort, le

0 9 DEC. 2011

AUTO-SAISINE

relative aux effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D

L'Anses peut se saisir elle-même de toute question entrant dans son champ de compétence (article R. 1336-16 du code de la santé publique).

Le présent document décrit les questions posées et les principales modalités en lien dans le cadre d'une auto-saisine.

Thématiques et objectifs :

L'auto-saisine proposée vise à répondre à la question de l'existence de risques potentiels liés à l'utilisation de technologies audiovisuelles en 3D.

Contexte de l'auto-saisine :

Ces dernières années ont vu le développement rapide de nouvelles technologies audiovisuelles en 3D. Après la multiplication des films en 3D au cinéma depuis le milieu des années 2000, on assiste aujourd'hui au développement de l'offre de téléviseurs, d'ordinateurs, de consoles de jeux et de téléphones portables en 3D. Les produits proposés utilisent des procédés qui n'impliquent plus nécessairement le port de lunettes spéciales, facilitant ainsi un large accès à ces technologies. Les systèmes audiovisuels en 3D trouvent aujourd'hui des applications aussi bien dans les secteurs domestiques que professionnels (simulateurs 3D par exemple).

Le développement de ces technologies 3D pose cependant la question de leur impact sur la santé et notamment sur la vision humaine. Plusieurs industriels émettent d'ailleurs des avertissements recommandant aux enfants ou aux populations souffrant de pathologies particulières d'éviter l'usage de leurs produits en 3D.

Dans un courrier en date du 27 janvier 2011, l'association « Robin des bois » a saisi l'Anses afin que celle-ci émette un avis au sujet des effets sanitaires de la console de jeux « Nintendo 3DS ». L'Anses a répondu à l'association « Robin des bois », dans un avis daté du 13 juillet 2011, que l'analyse de la littérature existante ne permettait de se prononcer ni sur les risques sanitaires liés à l'utilisation de consoles de jeux 3D, ni sur un âge limite à partir duquel l'exposition aux images 3D des consoles de jeux n'affecterait pas le développement visuel de l'enfant.

Considérant de plus :

- que certaines études scientifiques suggèrent que lors de la visualisation d'images en 3D, la fatigue visuelle semble apparaître plus vite et de manière plus intense qu'avec des images en 2D ;
- que les technologies 3D sont en constante évolution et que l'offre de matériel audiovisuel 3D, notamment à usage domestique, se développe rapidement ;
- que ces technologies peuvent être accessibles aux enfants dont le système visuel est en cours de développement ;

Auto-saisine de l'Anses

« GT – 3D »

- que les populations qui peuvent être exposées aux différentes technologies 3D sont très diversifiées (enfants, population générale, travailleurs, etc) ;

l'Agence avait annoncé, dans son avis sur le sujet, son intention de s'auto-saisir pour réaliser une expertise des risques sanitaires éventuels liés à l'ensemble des technologies audiovisuelles 3D.

Les travaux d'expertise à mener :

Afin d'évaluer les risques sanitaires potentiels des technologies 3D, les travaux d'expertise porteront sur :

- les technologies 3D, à travers un état de l'art des technologies audiovisuelles existantes ;
- Les mécanismes de la perception de l'environnement en 3D, y compris pour les enfants et les populations sensibles identifiées ;
- les effets sanitaires, à travers :
 - une analyse des travaux publiés ou en cours de publication concernant les effets sanitaires d'une exposition aux technologies audiovisuelles en 3D ;
 - le recensement des différents dangers potentiels relatifs à une exposition aux technologies en 3D ;
 - la caractérisation des différents modes d'exposition envisageables pour chaque technologie 3D ;
 - l'estimation des effets sanitaires potentiels, en décrivant les mécanismes biologiques associés y compris pour les populations sensibles.

Ces travaux d'expertise collective, qui pourraient être conduits par un groupe de travail placé sous l'égide du CES compétent, pourront utilement faire intervenir des auditions des parties prenantes (telles que les associations de consommateurs, les syndicats ou fédérations d'industriels des technologies audiovisuelles en 3D) ainsi que de toutes personnalités scientifiques permettant d'enrichir l'expertise.

Enfin, ce travail pourrait aboutir à la formulation, si nécessaire, de recommandations

- de recherche dans le domaine des technologies audiovisuelles en 3D ;
- visant à protéger la population et l'ensemble des populations sensibles.

Durée prévisionnelle de l'expertise :

Après une première étape visant à définir plus précisément le périmètre de l'expertise (identification des populations d'étude les plus pertinentes et du type de technologie 3D à étudier) qui pourrait durer 3 mois, la réalisation du travail pourrait prendre 18 mois.

Le Directeur général

Marc Mortureux



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
27-31 avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr