

Les disparités binoculaires des verres unifocaux

Céline Devisme^{a,b}, Björn Drobe^b, Guillaume Giraudet^b, Annie Monot^c, Jacques Droulez^a

^a LPPA, CNRS, Collège de France, Paris

^b R&D Optique Monde, Essilor International

^c Equipe Vision, CRCDCG, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris

Résumé

La disparité binoculaire est l'indice le plus pertinent dans la perception de la profondeur jusqu'à 2m¹. L'apposition de verres optiques devant les yeux va engendrer une modification de la distribution des disparités binoculaires existant naturellement dans les scènes visuelles. Ces modifications des disparités binoculaires peuvent avoir des répercussions sur la perception du relief et de la profondeur. L'analyse descriptive des disparités binoculaires, horizontales et verticales, produites par des verres optiques unifocaux permet de mettre en évidence l'influence plus ou moins importante des effets prismatiques dus à la puissance des verres, du décentrement des verres, de la base (rayon de la face avant des verres) et de l'angle pantoscopique. De même, des distributions particulières des disparités sont observées pour les verres cylindriques, les cas d'anisométrie ou encore pour des verres galbés. Cette analyse montre l'importance du centrage des verres en fonction des écarts pupillaires du porteur. De plus, ces disparités binoculaires induites par des couples de verres optiques vont pouvoir expliquer certaines difficultés rencontrées par les porteurs de corrections très fortes, ou très différentes entre les deux yeux.

Introduction

La perception de la profondeur est rendue possible grâce à des indices monoculaires et binoculaires présents dans l'environnement visuel. Les indices monoculaires sont des indices géométriques (perspective, flou, hauteur, taille, texture, occlusion) ou photométriques (perspective aérienne, ombres, brillant-reflet, transparence). Les indices binoculaires sont la vergence (convergence/accommodation) ou bien les disparités (verticale/horizontale, accommodation, géométrique, luminance). D'autres indices peuvent être ajoutés : le mouvement avec la parallaxe (mouvement de la tête ou mouvement de la cible), et des indices cognitifs (la constance de taille). Les interactions entre les indices de profondeur peuvent conduire soit à l'amélioration de la perception de la profondeur quand ils s'ajoutent, soit à sa détérioration quand ils s'opposent, on parle alors de conflit d'indices. Tous les indices

n'ont pas la même efficacité sur la perception du relief selon la zone de l'espace visuel considérée. Par exemple, pour la disparité binoculaire, son efficacité s'atténue linéairement avec l'augmentation de la distance par rapport à l'observateur. Ainsi Cutting et Vishton¹ ont défini trois espaces en fonction de la distance d'observation : un espace « personnel » (jusqu'à 2 m), un espace de l'action (entre 2 et 30 m), et un espace éloigné (au-delà de 30 m). Dans l'espace le plus proche, dit « personnel », la disparité binoculaire est un des indices le plus efficace.

Les yeux, séparés horizontalement de plusieurs centimètres, observent deux images distinctes d'une même scène visuelle, produisant deux points de vue différents de la même scène. Les disparités binoculaires, ou parallaxe binoculaire, sont les différences de position relative des projections du même objet sur les rétines des deux yeux. Les disparités ou différences entre l'image rétinienne de

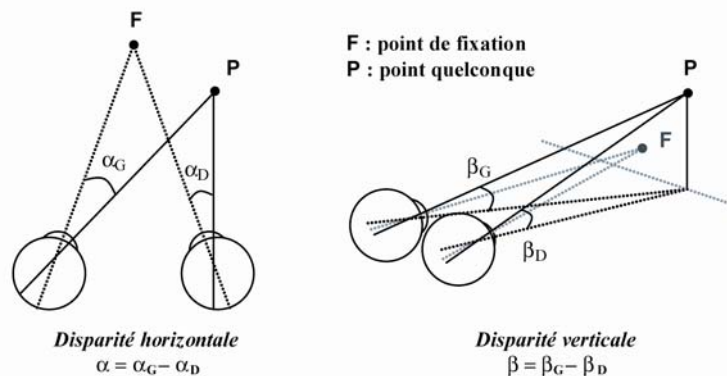


Figure 1 : Schémas illustrant la disparité binoculaire – les deux yeux fixant un point droit devant dans le plan médian de la tête (F), un point quelconque de l'espace (P) sera disparate. Le schéma de gauche représente la disparité horizontale et le schéma de droite la disparité verticale.

l'œil droit et celle de l'œil gauche, présentes dans tout le champ visuel en dehors du point fixé, vont permettre au cerveau de reconstruire précisément un espace tridimensionnel.

La *disparité horizontale* (α) d'un point quelconque de l'espace est mesurée par la différence d'azimut de ce point entre les deux yeux : $\alpha = \alpha_G - \alpha_D$, où α_G et α_D sont les azimuts du point disparate avec le point de fixation (angles entre le plan vertical passant par le point disparate et le point nodal de l'œil et le plan vertical passant par le point de fixation et le point nodal du même œil), pour les yeux gauche et droit respectivement (Figure 1). Le lieu des points de disparité horizontale nulle est l'horoptère théorique, il s'agit d'un cercle, appelé cercle de Vieth-Müller, passant par le point de fixation et le point nodal de chaque œil². Par convention, pour un point à l'intérieur du cercle de Vieth-Müller, la disparité est positive et couramment appelée *croisée*. Pour un point à l'extérieur du cercle de Vieth-Müller, la disparité est négative ou *homonyme*³.

La *disparité verticale* (β) d'un point quelconque de l'espace est mesurée par la différence d'élévation de ce point dans les deux yeux : $\beta = \beta_G - \beta_D$, où β_G et β_D sont les angles d'élévation du point disparate par rapport au plan horizontal, pour les yeux gauche et droit respectivement (Figure 1). Les images de la plupart des scènes visuelles contiennent des

différences verticales. Les disparités verticales apparaissent quand un objet sous-tend un angle plus grand pour un œil que pour l'autre, parce qu'il est plus près d'un œil que de l'autre. En d'autres termes, la disparité verticale résulte d'un grossissement différentiel qui apparaît quand le point est plus proche d'un œil que de l'autre, ce qui se produit pour tous les points hors du plan médian de la tête. Notons que les valeurs des disparités d'une scène visuelle dépendent du système de coordonnées choisi pour les mesurer. Le système de coordonnées le plus adapté aux mesures des disparités binoculaires est le repère longitudinal-azimut / latitudinal-élévation, celles-ci n'étant pas affectées par les mouvements de vergence et de version binoculaire. Dans ce repère, pour des yeux alignés verticalement, dans les scènes naturelles, il ne peut y avoir de disparité verticale pour tous les points du plan médian de la tête et du plan horizontal passant par les deux yeux⁴. De plus, les disparités verticales donnent un sens de relief différent selon leur signe et le quadrant du champ visuel considéré (Figure 2). On parlera de sens ou de signe du relief pour indiquer que le point disparate, formé par l'image de l'œil droit et celle de l'œil gauche, se trouve en avant ou en arrière du plan frontal passant par le point de fixation. Un exemple de disparité verticale, appelé « effet induit », peut être mis en évidence grâce à un verre cylindrique de puissance $(+2,00)0^\circ$ placé

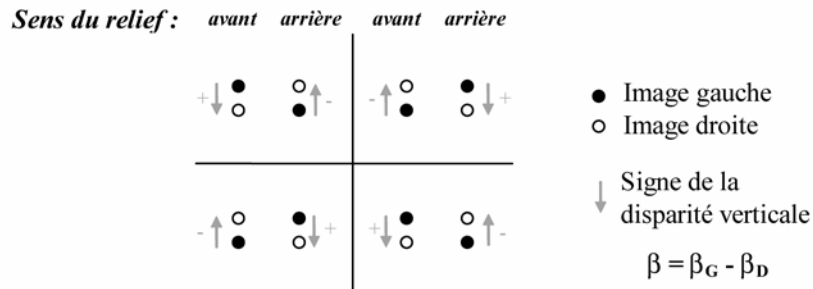


Figure 2 : Représentation schématique du décalage des images droite et gauche l'une par rapport à l'autre indiquant le signe de la disparité verticale. Dans chacun des quatre quadrants autour du point de fixation, selon le signe de la disparité on observe un sens du relief différent (d'après Matthews *et al.*⁵).

devant un œil. L'effet induit est donc le résultat du grossissement vertical de l'image d'un des deux yeux, qui produit, outre un inconfort, une perception de rotation du plan frontal autour d'un axe vertical⁶. La Figure 2 permet d'expliquer cette perception : si le verre cylindrique susmentionné est placé devant l'œil gauche, l'image de l'œil gauche présentera un grossissement verticalement par rapport à l'image de l'œil droit. Le signe de la disparité verticale sera alors positif dans les quadrants supérieurs, et négatif dans les quadrants inférieurs. Ainsi, le sens du relief perçu sera vers l'avant dans l'hémichamp droit et vers l'arrière dans l'hémichamp gauche. Ce conflit entre les différentes perceptions à droite et à gauche du point de fixation serait interprété par le cerveau comme une rotation du plan autour d'un axe vertical.

Dans les scènes visuelles, des distributions de disparités binoculaires existent naturellement dans le champ visuel à l'exception du point fixé dans la scène et des points de l'horoptère. Mais il est également possible d'ajouter à ces distributions « naturelles » des patterns de disparités binoculaires, en plaçant par exemple des systèmes optiques devant les yeux. C'est le cas des verres ophtalmiques qui sont nécessaires pour corriger les amétropies, mais induisent des disparités binoculaires additionnelles. La présente étude décrit les disparités horizontales et verticales produites par des verres

ophtalmiques unifocaux, dans les conditions habituelles de port (centrage des verres sur les écarts pupillaires, base standard pour la puissance choisie, etc), selon la correction ou la distance de fixation. Puis les implications, en termes de disparités induites par les erreurs de montage, le choix d'une base plus ou moins cambrée (plus plate), voire très cambrée pour des verres galbés, seront envisagées et discutées.

Méthode

Les disparités binoculaires induites par un couple de verres ophtalmiques proviennent des déformations produites par chacun des verres. Chaque verre crée des déformations de la scène visuelle, causées par les effets prismatiques dus à la puissance du verre. Les deux scènes déformées par les verres sont fusionnées, induisant ainsi des disparités binoculaires supplémentaires dans le champ visuel, à l'exception du point de fixation. Pour obtenir les déformations produites par chacun des verres, une grille régulière est placée devant les deux verres (Figure 3 (a)), et centrée sur le plan médian des deux verres et le plan horizontal passant par les centres optiques des verres. Pour chaque verre, une grille déformée est obtenue, correspondant à la déformation de la grille régulière à travers le verre étudié. Les verres concaves, ou négatifs, produisent des déformations en barillet (Figure 3 (b)) et les verres convexes, ou positifs, des

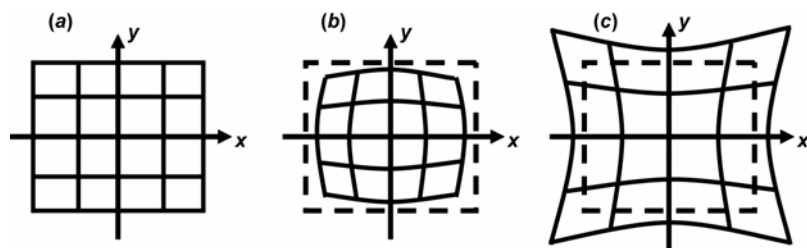


Figure 3 : représentation schématique d'une grille régulière (a) vue à travers un verre concave (b) et à travers un verre convexe (c).

déformations en coussinet (Figure 3 (c)). Ces grilles déformées représentent les distorsions du champ visuel produites par un verre, elles sont obtenues par le tracé des rayons passant par le point nodal d'un œil (dont le centre de rotation se trouve 25 mm en arrière du verre) et par chaque point de la grille. Chaque nœud de cette grille déformée peut donc présenter des coordonnées différentes de celles de la grille régulière initiale.

Dans le cas d'un couple de verres ophtalmiques, une grille déformée par verre est ainsi obtenue (Figure 4, grilles rouge et verte). Les coordonnées de chaque nœud des grilles déformées pour chacun des deux verres par rapport à la même grille initiale permettent de calculer des valeurs de disparités binoculaires induites. La grille initiale, placée dans un plan frontal, présente déjà des disparités de par sa position, différente de l'horoptère (cf. Introduction). Les disparités calculées sont les disparités totales, obtenues avec l'apposition de verres, auxquelles sont soustraites les disparités de la grille

initiale. Par conséquent, pour une grille initiale régulière, vue au travers d'un couple de verres ophtalmiques, à chaque nœud correspondent une valeur de disparité horizontale et une valeur de disparité verticale. Notons que le point de fixation, qui est le centre de la grille dans tous les cas, a toujours une disparité nulle, aussi bien en disparité horizontale qu'en disparité verticale. La convergence des yeux sur un point de fixation compense les disparités qui pourraient être présentes.

Dans la présente étude, la grille régulière initiale est simulée dans un plan frontal à la même distance des deux verres dans tous les cas, fixée à 625 mm, cette distance se situant dans l'espace « personnel » défini par Cutting et Vishton¹. La grille initiale utilisée compte 31 nœuds horizontaux sur 31 nœuds verticaux pour une dimension de 1,50 m × 1,50 m. Les verres utilisés sont d'indice de réfraction 1,5. De plus, l'écart entre les centres optiques des verres, correspondant à un écart inter-pupillaire moyen, est fixé à 65 mm, et les yeux sont considérés en

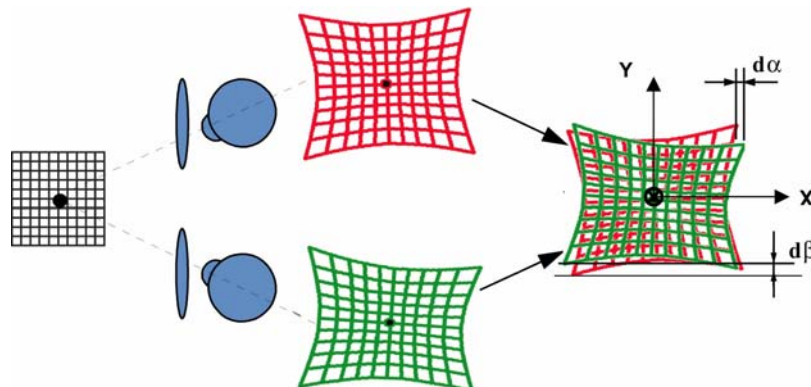


Figure 4 : Calcul des disparités binoculaires : on vient fusionner le centre des 2 images en déplaçant la nappe gauche pour superposer dans le repère les 2 centres, puis on calcule en chaque nœud les différences OG – OD horizontales (X) et verticales (Y). Exemple d'un couple de verres convexes (positifs).

convergence symétrique. En effet, un observateur fixant binoculairement le centre d'une grille placée à 65 cm, les deux yeux ne regardent pas droit devant (ce qui reviendrait à placé la grille à l'infini), mais convergent vers le point de la grille situé dans le plan médian des deux yeux avec un angle de convergence d'environ 6° . Le champ visuel binoculaire considéré pour les cartes de disparités est de forme elliptique de 120° de grand axe horizontal sur 100° de petit axe vertical, centré sur le point de fixation. Les résultats sont présentés sous la forme de cartes représentant les disparités binoculaires, dans le champ visuel, par des lignes d'iso-disparité horizontale ou verticale, l'unité angulaire des disparités étant la minute d'arc. Les lignes d'iso-disparité relient les points de coordonnées, en azimuth et élévation, voisines ayant même valeur de disparité.

Les différents paramètres étudiés sont : la puissance ($-2,00 \delta$; $+2,00 \delta$; $+4,00 \delta$), la distance de fixation (35 cm, 1m, 2m), la base (ou le rayon de courbure de la face avant du verre, qui dépend de la puissance du verre), l'angle pantoscopique (15°), le décentrement (3 mm temporal ou nasal) et le galbe (15 , 30°). Puis, seront analysés les cas particuliers d'anisométrie et d'astigmatisme.

Description des disparités des verres optiques unifocaux

La puissance

Les couples de verres concaves (de puissance négative) créent des disparités horizontales négatives ou homonymes sur une grande partie du champ visuel. Par opposition, les couples de verres convexes (de puissance positive) produisent des disparités horizontales positives ou croisées sur une grande partie du champ visuel (Figure 5).

La disparité horizontale augmente de façon plus rapide dans le méridien vertical que

dans le méridien horizontal. L'augmentation de la disparité horizontale se fait approximativement de façon concentrique selon une ellipse de grand axe horizontal. Ainsi, les champs latéraux droit et gauche présentent peu de disparités, entraînant moins de déformations que les champs supérieur et inférieur. La Figure 5 montre également que les disparités verticales sont nulles dans les méridiens horizontal et vertical. Dans chaque quadrant, la disparité verticale augmente des méridiens horizontal/vertical vers la zone la plus excentrée du quadrant, comme l'indique le graphique de droite de la Figure 6. Le signe des disparités verticales est opposé entre quadrants voisins de telle sorte que le signe du relief est le même dans tout le champ binoculaire des verres (cf. schéma du sens du relief en fonction du signe et du quadrant, Figure 2) : le signe de relief est vers l'arrière pour les couples de verres concaves et vers l'avant pour les couples de verres convexes. Pour un couple de verres concaves, les disparités horizontales étant homonymes, le signe de relief est vers l'arrière et les disparités verticales indiquent également un signe de relief vers l'arrière. Les disparités horizontales et verticales sont donc de même signe de relief pour les couples de verres sphériques de même puissance.

Avec l'augmentation de la puissance des deux verres, conjointement, on observe une augmentation des disparités horizontales (Figure 6). Notons que les disparités horizontales et verticales sont très faibles pour un verre plan (de puissance nulle), néanmoins elles ne sont pas nulles. La présence de disparités, dans le cas du verre plan, s'explique par le fait que les verres dits « plans » sont constitués de deux dioptries ayant des rayons de courbure non infinis. Entre les couples de verres convexes et les couples de verres concaves, l'augmentation, en valeur absolue, des disparités horizontales en fonction de l'excentricité n'est pas exactement semblable : dans le méridien

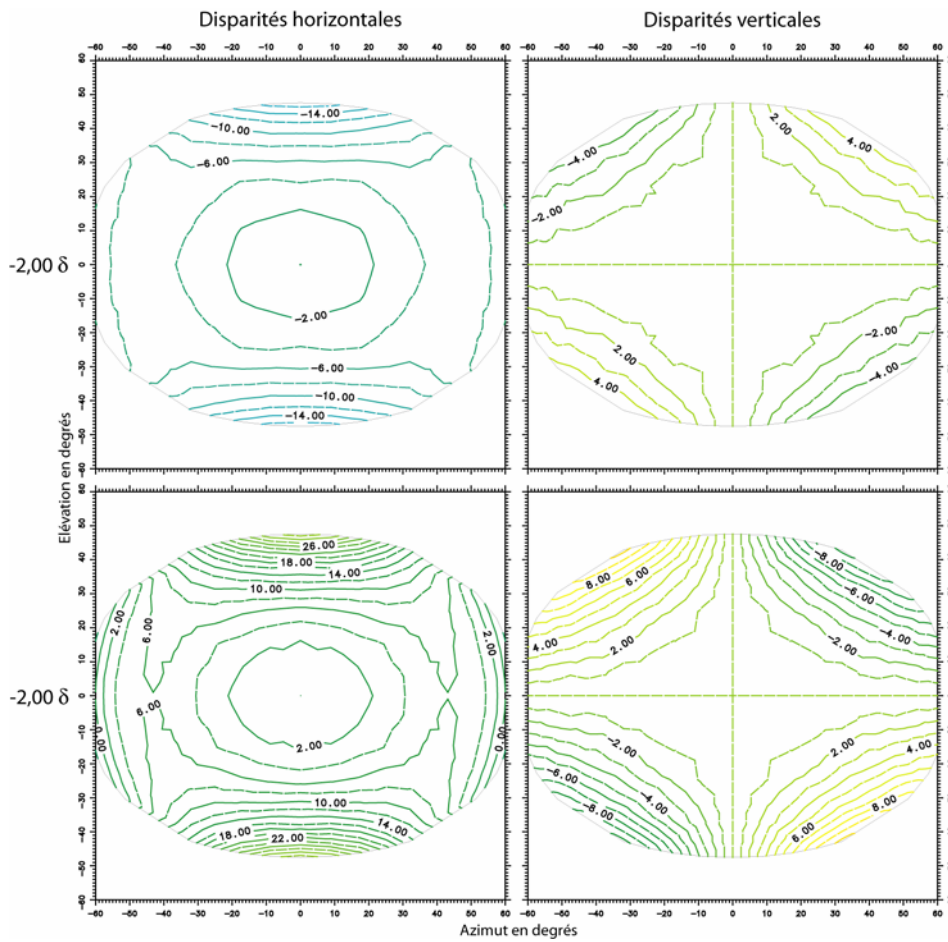


Figure 5 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres de puissance $-2,00 \delta$ (en haut) et un couple de verres de puissance $+2,00 \delta$ (en bas) : les cartes représentent la valeur de la disparité pour chaque point du champ visuel ; chaque point est défini par ses coordonnées x et y correspondant à l'excentricité par rapport au point de fixation (respectivement l'azimut et l'élévation, notées en degré autour du cadre) ; les mêmes valeurs de disparité sont représentées par une même ligne (continue ou pointillée, avec un pas de 2 arcmin pour les disparités horizontales et de 1 arcmin pour les disparités verticales) ; l'unité des disparités indiquées sur les lignes est la minute d'arc.

vertical, l'augmentation de la disparité horizontale avec l'excentricité est plus rapide, à partir de $15-20^\circ$ d'excentricité, pour les verres concaves que pour les verres convexes (avec des valeurs environ deux fois supérieures vers 40° d'excentricité, cf. Figure 6). Les verres positifs induiront donc plus de déformations que les verres négatifs, en particulier vers le haut et vers le bas du champ visuel binoculaire. Dans le méridien horizontal, les verres concaves et convexes présentent des variations plus semblables. L'asymétrie entre les verres concaves et les verres convexes peut s'expliquer en partie par la présence initiale de disparités positives (croisées) pour des verres de

puissance nulle, dues à la courbure des dioptries. Le passage d'une puissance de $+2,00 \delta$ à une puissance de $+4,00 \delta$ entraîne une augmentation importante des disparités horizontales, à partir de 10° d'excentricité. Ainsi on observe que, dans un disque de 10° de rayon autour du point de fixation, les disparités varient très peu avec l'augmentation de la puissance, et au-delà l'augmentation des disparités horizontales est proportionnelle à l'augmentation de puissance. Les disparités verticales augmentent également avec l'augmentation de puissance, de façon semblable dans les quatre quadrants. De même, il existe une asymétrie de vitesse d'augmentation de la disparité verticale

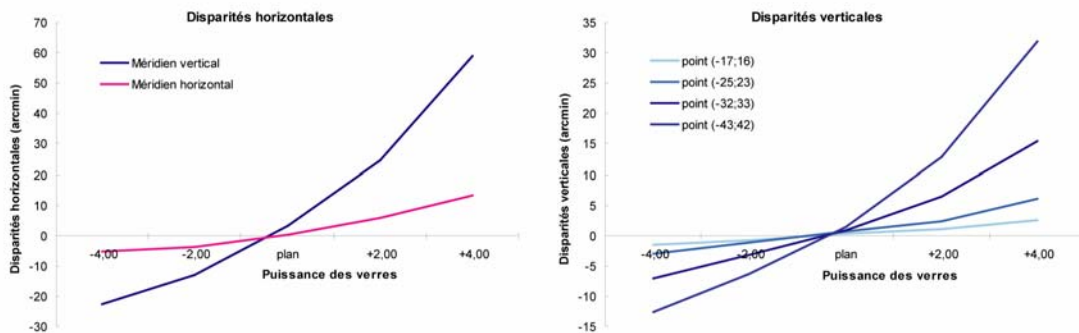


Figure 6 : variation de la disparité horizontale (à gauche) et de la disparité verticale (à droite) en fonction de la puissance des verres étudiés (-4,00 δ ; -2,00 δ ; plan ; +2,00 δ ; +4,00 δ) pour plusieurs points du champ visuel : pour les disparités horizontales, il s'agit de deux points à 43° d'excentricité sur le méridien horizontal (en rose) et sur le méridien vertical (en bleu) ; pour les disparités verticales, ce sont 4 points (dont les coordonnées sont en légende) d'un même quadrant.

avec la puissance entre les verres convexes et les verres concaves (Figure 6). Par conséquent, les porteurs isométropes, qu'ils soient myopes ou hypermétropes, observeront peu de déformations autour du point de fixation dans un disque de 10° de rayon. En périphérie, au-delà de ce disque de 10°, des déformations de la perception de profondeur pourront être perçues, d'autant plus importantes que la puissance des verres sera importante, et plus particulièrement dans les parties supérieures et inférieures du champ visuel. Les modifications de la profondeur, si elles sont perçues, produiront, dans tout le champ visuel binoculaire, des déformations concaves pour les verres positifs et convexes pour les verres négatifs, où la concavité/convexité est plus importante dans le méridien vertical que dans le

méridien horizontal.

La distance de fixation

La question que l'on peut se poser est de savoir si les disparités sont les mêmes quelle que soit la distance du point fixé. Le déplacement en profondeur de la grille initiale modifie les disparités horizontales et verticales de la façon suivante : l'éloignement de la grille produit une diminution des disparités et inversement, le rapprochement de la grille par rapport à l'observateur augmente les disparités (Figure 7). C'est, plus exactement, la valeur de la disparité en chaque point qui augmente proportionnellement avec la diminution de la distance de fixation : par exemple, entre les distances 2 m et 1 m, les disparités en

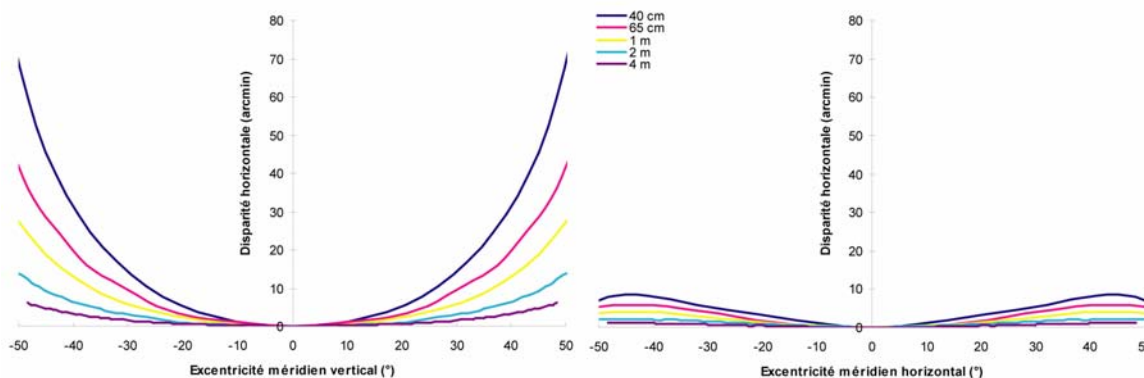


Figure 7 : Variation de la disparité horizontale en fonction de l'excentricité en élévation (à gauche, méridien vertical) et en fonction de l'excentricité azimutale (à droite, méridien horizontal) pour plusieurs distances de fixation (40 cm, 65 cm, 1 m, 2 m, 4 m), pour un couple de verres de +2,00 δ.

chaque point vont être augmentées dans un rapport d'environ 2, de telle sorte que la grille de disparité pour une distance de 1 m présente des disparités deux fois plus importantes que la grille placée à une distance de 2 m. Cette augmentation de la disparité horizontale est plus importante dans le méridien vertical que dans le méridien horizontal. Pour la disparité verticale, on retrouve également l'augmentation de la disparité avec la diminution de la distance conjointement dans chacun des quatre quadrants.

Ainsi pour un même couple de verres, les disparités horizontales comme verticales sont plus importantes quand on regarde à proximité et moins importantes quand on regarde au loin. En d'autres termes, la modification des disparités du champ visuel est plus importante en vision de près qu'en vision de loin, donc des modifications de la profondeur ou des déformations du relief seront plus facilement perçues au près. Le champ visuel pourra être perçu incurvé, plus ou moins concave/convexe avec toujours la plus forte concavité/convexité dans le méridien vertical, quelle que soit la distance. Notons que, dans le cas d'une fixation au-delà de 2 m, les disparités induites par des verres sont faibles, et sachant que l'indice de perception de la profondeur par la disparité est très peu utilisé dans cet espace éloigné¹, les

déformations produites par ces disparités, bien que faibles, seront probablement peu perçues.

L'angle pantoscopique

L'angle pantoscopique correspond à une inclinaison du plan des verres par rapport à un axe horizontal, généralement l'inclinaison est telle que la partie supérieure du plan des verres s'incline vers l'avant (Figure 8).

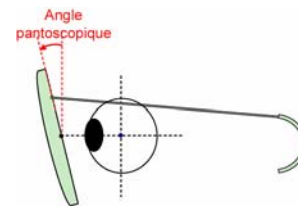


Figure 8 : Représentation schématique de la définition de l'angle pantoscopique : Positionnement du verre gauche devant l'œil, vue de profil.

Entre un angle pantoscopique nul (verres dans un plan frontal) et un angle pantoscopique de 15° , les lignes d'iso-disparité horizontale se décalent globalement vers le bas (Figure 9). Le point de fixation ayant toujours une disparité nulle, on observe une petite zone, étendue jusqu'à environ 15° vers le bas, de disparité nulle. Pour les cartes d'iso-disparité verticale, on observe un « étirement » des lignes d'iso-disparité

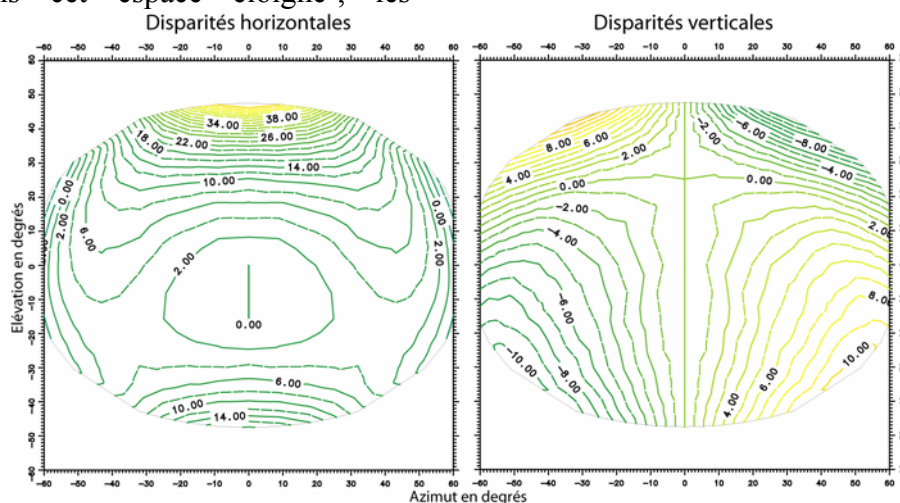


Figure 9 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres de $+2,00 \delta$ placé devant les yeux selon un angle pantoscopique de 15° .

verticale vers le haut. Les valeurs maximales dans une même fenêtre visuelle sont les mêmes mais la ligne de zéro disparité est déplacée vers le haut entraînant un espacement des lignes d'iso-disparité au-dessous et un resserrement des lignes au-dessus.

Le resserrement des lignes d'iso-disparité, horizontale comme verticale, dans la partie supérieure du champ visuel, pourrait entraîner des déformations : la concavité/convexité, qui pouvait être perçue avec les mêmes verres placés dans le plan frontal, sera dans ce cas accentuée dans la partie supérieure du champ visuel. Néanmoins, il faut mentionner que cette augmentation plus rapide des disparités vers le haut ne commence réellement qu'à partir de 20-25° d'excentricité. Or, dans la vie courante, les éléments présentant le plus d'intérêt, quand les axes visuels sont alignés sur le méridien horizontal des verres, se situent plutôt au centre du champ

visuel ou dans l'hémi-champ inférieur. Dans les zones centrale et inférieure, les déformations seront moins importantes car les disparités sont plus faibles et augmentent moins vite qu'avec des verres d'angle pantoscopique nul.

Le décentrement horizontal

Les décentres testés sont volontairement importants : des décentres horizontaux, bilatéraux de 3 mm pour chaque verre (soit 6 mm au total), sont appliqués, en nasal ou en temporal conjointement. Pour les disparités horizontales, un décentrement bilatéral de 3 mm en nasal provoque un resserrement des lignes d'iso-disparité vers le centre. Pour les zones latérales droite et gauche, ce resserrement des lignes d'iso-disparité horizontale met en évidence des disparités de signe opposé à la zone centrale et augmentant relativement rapidement à partir de 40° d'excentricité (Figure 10,

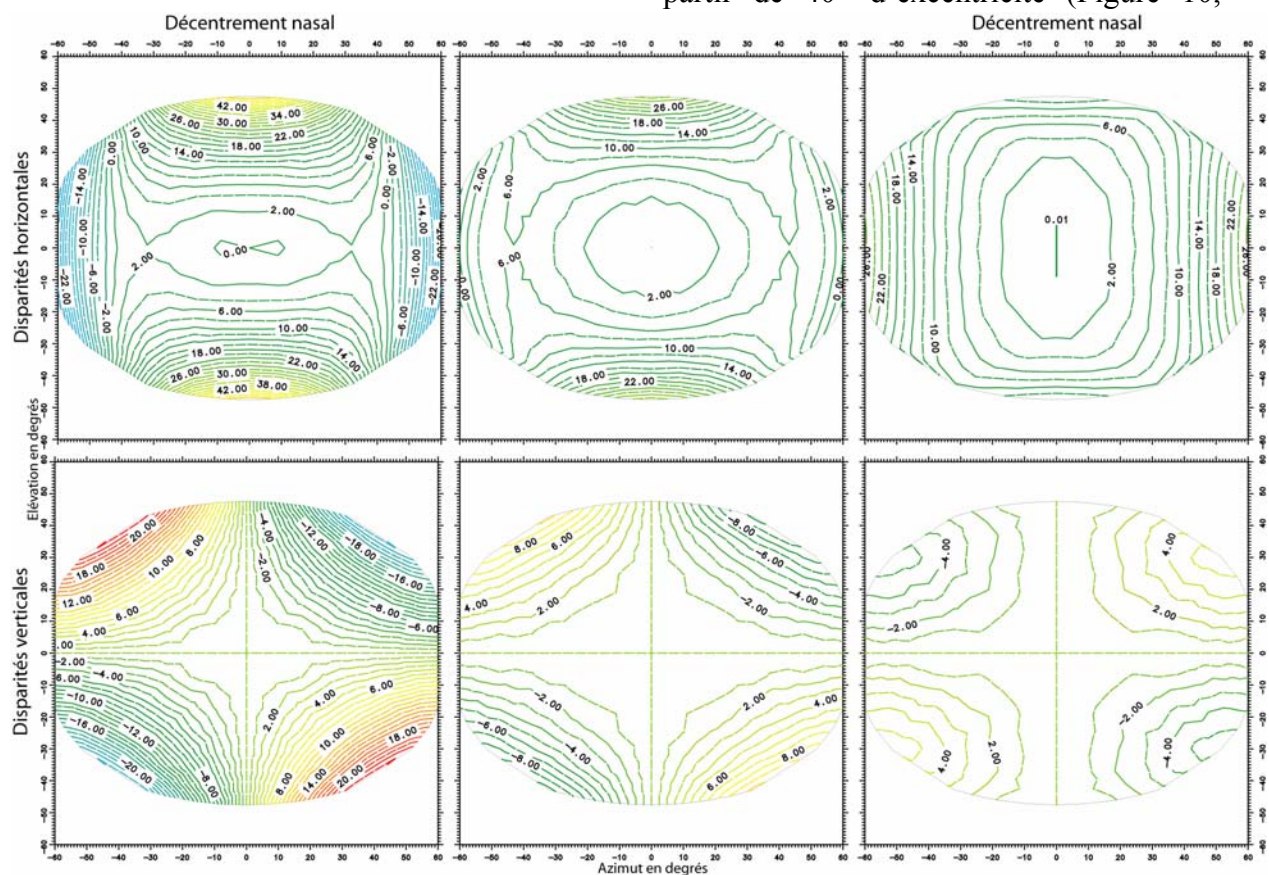


Figure 10 : Cartes d'iso-disparités horizontales (en haut) et verticales (en bas) pour un couple de verres de +2,00 δ , décentrés de 3 mm en nasal pour les deux yeux (à gauche) ou de 3 mm en temporal pour les deux yeux (à droite), le couple de verres correctement centrés se trouvant au centre.

carte supérieure gauche). Le même décentrement bilatéral temporal va produire un rapprochement vers le centre des lignes d'iso-disparité latérales droites et gauches avec une augmentation plus importante des disparités, alors que les lignes d'iso-disparité supérieures et inférieures vont plutôt s'éloigner vers la périphérie (Figure 10, carte supérieure droite). Pour les disparités verticales, le décentrement nasal entraîne un resserrement concentrique des lignes d'iso-disparité (Figure 10, carte inférieure gauche), équivalent à ce que l'on observe quand on augmente la puissance (passage de $+2,00 \delta$ à $+4,00 \delta$ dans le présent exemple). Par contre, le décentrement temporal produit un écartement des lignes d'iso-disparité verticale, avec même un changement de signe des disparités verticales, observable à partir de 2 mm de décentrement (Figure 10, carte inférieure droite).

Par conséquent, un inconfort pourrait être ressenti par le porteur essentiellement sur les côtés droit et gauche du champ visuel binoculaire pour un décentrement bilatéral temporal, mais également dans les parties supérieures et inférieures du champ visuel pour un décentrement bilatéral nasal. Les disparités horizontales et verticales risquent d'entraîner des modifications de la perception de la profondeur différentes selon le décentrement appliqué : le décentrement nasal, pour un couple de verres convexes, produirait, par les disparités horizontales, une perception vers l'arrière dans les champs périphériques latéraux droit et gauche, par opposition à la perception vers l'avant sur $\pm 40^\circ$ autour du méridien vertical ; par contre, les disparités verticales indiquerait une perception vers l'avant dans tout le champ, entraînant un conflit de perception dans les champs périphériques droit et gauche ; pour le décentrement temporal de 3 mm, le relief est vers l'avant pour les disparités horizontales, mais vers l'arrière pour les disparités verticales, de faibles amplitudes, ainsi les disparités horizontales et

verticales sont en conflit sur tout le champ visuel. Ces conflits entre le sens de relief indiqué par les disparités horizontales et celui indiqué par les disparités verticales peuvent créer des gênes pour le porteur présentant une erreur de centrage de ses verres ou nécessitant une prescription prismatique corrigée par décentrement des verres.

La base

La base correspond à l'inverse du rayon de la face avant du verre : $\frac{n-1}{R}$ où n

est l'indice du verre et R le rayon de la face avant du verre. Plus la valeur de la base est élevée, plus le rayon est petit et plus la face avant est cambrée, et inversement. Une base théorique est calculée à partir des ellipses de Tscherning⁷, représentant graphiquement la relation entre la courbure de base, la puissance du verre et les aberrations (erreur de puissance et astigmatisme oblique) : pour chaque puissance de verre, une valeur de base (ou deux valeurs, et dans ce cas la base la plus plate sera privilégiée) permet de minimiser ces aberrations, il s'agit de la base théorique choisie en pratique. Pour les verres positifs ou convexes, la base théorique est plus grande que pour les verres négatifs, ou concaves. La base des verres a pour effet sur les disparités horizontales d'écarter les lignes d'iso-disparité vers les champs périphériques droit et gauche quand elle augmente et de les resserrer vers le centre (le point de fixation) quand elle diminue. Pour les disparités verticales, c'est l'inverse, les lignes d'iso-disparité s'écartent sensiblement avec la diminution de la base et se resserrent sensiblement avec l'augmentation de la base. La variation des disparités en fonction de la base est approximativement linéaire pour chaque point d'excentricité : la diminution de la disparité horizontale avec l'augmentation de la base est faible pour les points du méridien vertical, par contre elle est plus

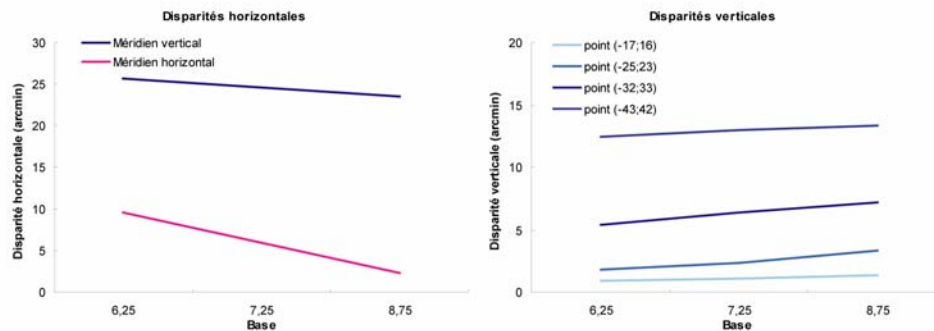


Figure 11 : Variation de la disparité horizontale (à gauche) et de la disparité verticale (à droite) en fonction de la base (7,25 étant la base théorique ; 6,25 une base plus plate et 8,75 une base plus cambrée), pour un couple de verres de +2,00δ pour plusieurs points du champ visuel : pour les disparités horizontales, il s’agit de deux points à 43° d’excentricité sur le méridien horizontal (en rose) et sur le méridien vertical (en bleu) ; pour les disparités verticales, ce sont 4 points (dont les coordonnées sont en légende) d’un même quadrant.

rapide sur le méridien horizontal, au-delà de 20° d’excentricité (Figure 11) ; La disparité verticale augmente faiblement avec l’augmentation de la base. Ainsi, une base plus plate, donc plus petite, que la base théorique pour une puissance donnée augmente les disparités horizontales, et diminue légèrement les disparités verticales, et inversement pour une base plus cambrée.

Pour minimiser les disparités horizontales, des verres de base plus cambrée seraient préférables, mais pour les disparités verticales ce seraient plutôt des verres de base plus plate. Ainsi la base théorique choisie semble un bon compromis entre les disparités horizontales et les disparités verticales. Néanmoins, il faut noter que les disparités verticales sont faiblement influencées par la modification de la base, comparativement aux disparités horizontales autour du méridien horizontal. Aussi, un moyen de diminuer les disparités horizontales des champs latéraux droit et gauche, si celles-ci sont très importantes, pourra être de choisir une base plus petite modifiant finalement peu les disparités verticales, sans oublier que la modification de la base a finalement peu d’influence sur l’ensemble des disparités binoculaires.

Le galbe

Le galbe d’un verre correspond à sa

cambrure ou son orientation devant l’œil par rapport à un axe vertical (Figure 12). Habituellement le galbe des verres est faible, mais il est possible de l’augmenter de telle sorte que la partie temporale des verres soit en arrière par rapport à la partie nasale.

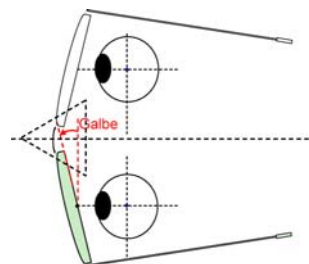


Figure 12 : Représentation schématique de la définition du galbe Positionnement du verre gauche devant l’œil, vue de dessus.

Le fait d’augmenter le galbe modifie le signe des disparités horizontales (Figure 13). Par exemple pour des verres convexes (+2,00 δ) non galbés, les disparités horizontales sont globalement positives, alors qu’avec un galbe de 15° pour les deux verres, les disparités horizontales deviennent négatives et augmentent considérablement en valeur absolue. Par contre, dans le cas des disparités verticales, leur signe dans chaque quadrant du champ visuel ne change pas, seules les valeurs absolues augmentent avec l’augmentation du galbe.

Ainsi, le sens du relief induit par les

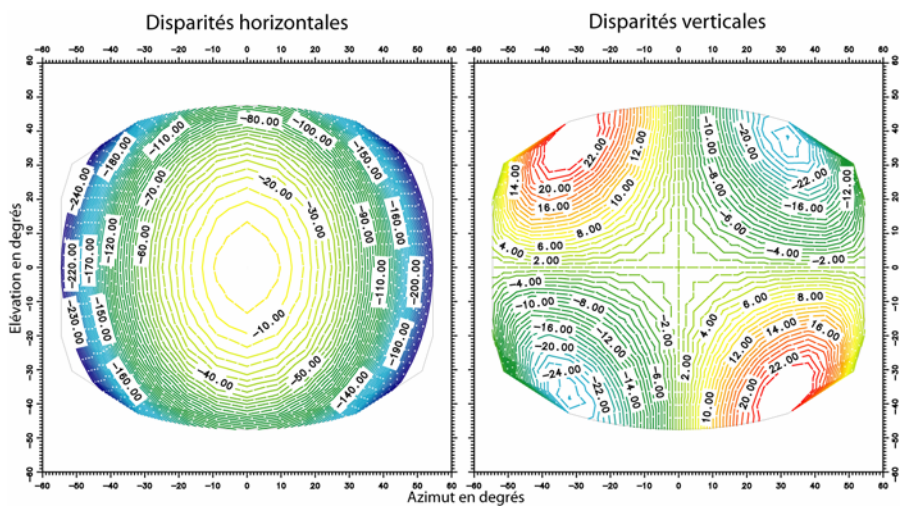


Figure 13 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres de +2,00 δ avec un galbe de 15°.

disparités horizontales et les disparités verticales, qui est le même pour des verres non galbés, sera de signe opposé dans le cas des verres très cambrés : un couple de verres convexes (+2,00 δ par exemple), galbés, présente des disparités horizontales homonymes (négatives) donc de sens de relief en arrière alors que les disparités verticales indiquent un sens de relief en avant. On retrouve les résultats inverses pour les couples de verres concaves. Ainsi, d'une part les valeurs de disparités très importantes et d'autre part les sens de relief contraires entre les disparités horizontales et les disparités verticales vont modifier la perception de la profondeur des porteurs par rapport à des verres non galbés. Les porteurs de verres très galbés risquent d'être très gênés, à cause des disparités horizontales qui leur indiqueraient un relief dans une direction (par exemple vers l'arrière pour un hypermétrope), quand les disparités verticales entraîneraient plutôt un relief de sens opposé (vers l'avant pour l'exemple de l'hypermétrope). Ce conflit entre la perception produite par les disparités horizontales et celle des disparités verticales peut être perturbant perceptivement, d'autant plus que les valeurs de disparités sont très supérieures aux verres non galbés.

Les verres cylindriques

Prenons l'exemple d'un couple de verres cylindriques de corrections :

$$\text{OD : } -2,00(+1,00)45^\circ ; \quad \text{OG : } -2,00(+1,00)135^\circ$$

Les axes sont perpendiculaires donc symétriques entre les deux yeux. Les disparités horizontales augmentent de telle sorte que les lignes d'iso-disparité horizontale sont approximativement longitudinales joignant les extrémités gauche-droite du champ visuel (Figure 14) : l'augmentation des disparités est plus rapide en périphérie latérale droite et gauche, qu'au niveau du méridien vertical. Le long du méridien horizontal, la disparité est nulle. Il faut également ajouter que les disparités horizontales sont croisées dans le champ visuel supérieur, et homonymes dans le champ visuel inférieur. Ainsi, par les disparités horizontales, la partie supérieure du champ visuel présentera un relief vers l'avant et la partie inférieure un relief vers l'arrière. Pour les disparités verticales, les lignes d'iso-disparité sont orientées verticalement et plutôt latitudinales : l'augmentation des disparités verticales se fait surtout horizontalement. Le signe des disparités verticales est négatif dans le champ visuel gauche et positif dans le champ visuel droit, ce qui

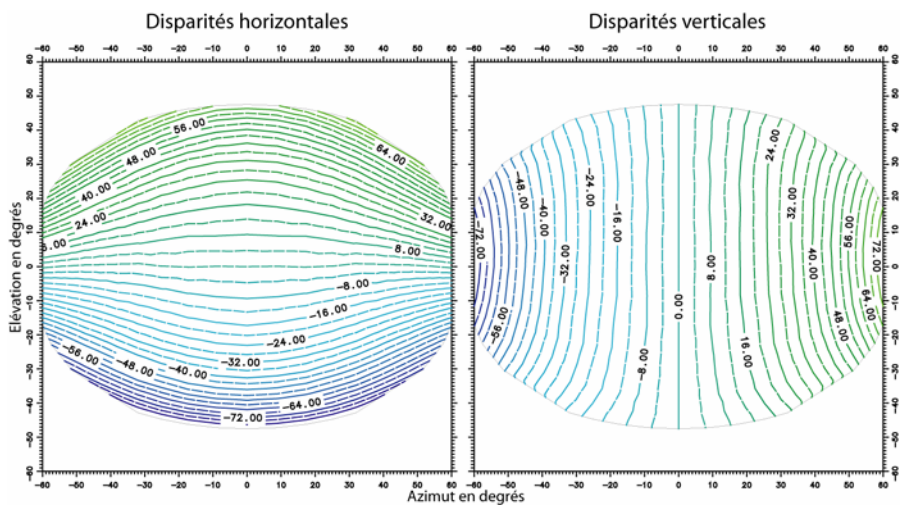


Figure 14 : Cartes d’iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres cylindriques de correction : OD = -2,00(+1,00)45° ; OG = -2,00(+1,00)135°

donne, en terme de signe de relief, un relief vers l’arrière pour la partie supérieur du champ visuel et un relief vers l’avant pour la partie inférieur du champ visuel. Les disparités verticales sont donc de signe de relief opposé aux disparités horizontales.

Les disparités horizontales induisent donc une perception d’inclinaison, pour une surface, par rapport à un axe horizontal dans une direction, et les disparités verticales une perception d’inclinaison de sens opposé. Ainsi les disparités horizontales sont en conflit avec les disparités verticales au niveau de la perception de relief.

L’anisométrie

Prenons l’exemple d’un couple de verres anisométriques : OD + 2,00 δ ; OG + 4,00 δ. Ces deux verres pris individuellement n’ont pas la même base théorique. Généralement, dans les cas d’anisométrie supérieure à 1,00 δ, une base commune pour les deux verres sera choisie, correspondant à la plus plate des bases théoriques de chaque verre : pour l’exemple d’anisométrie ci-dessus, il s’agit de la base du verre de +2,00 δ, soit une base de 7,25 (Figure 15). Quelle que soit la base choisie pour les deux verres, les disparités horizontales augmentent horizontalement, les lignes d’iso-disparité

sont longitudinales de haut en bas. Pour cet exemple, les disparités horizontales sont croisées dans la partie droite du champ visuel (relief vers l’avant) et homonymes dans la partie gauche (relief vers l’arrière). Les disparités verticales varient verticalement selon des lignes d’iso-disparité latitudinales droite-gauche.

Pour les disparités horizontales comme verticales, les lignes d’iso-disparité sont légèrement resserrées du côté du verre de plus forte puissance (ici le côté gauche du champ visuel correspond au verre de +4,00 δ). Dans cet exemple, les disparités verticales sont de signe positif dans le champ visuel supérieur et de signe négatif dans le champ visuel inférieur. Ainsi, le sens du relief, prévisible par le signe des disparités verticales, indique un relief vers l’arrière dans le champ visuel droit et vers l’avant dans le champ visuel gauche, c’est-à-dire l’inverse du relief produit par les disparités horizontales. D’autre part, les valeurs de disparités horizontales comme verticales sont beaucoup plus élevées que pour des couples de verres isométriques. Les disparités horizontales produiraient donc une perception de rotation d’une surface autour d’un axe vertical dans une direction, et les disparités verticales une perception de rotation dans la direction opposée. La correction par des lunettes des anisométriques crée donc un conflit dans la

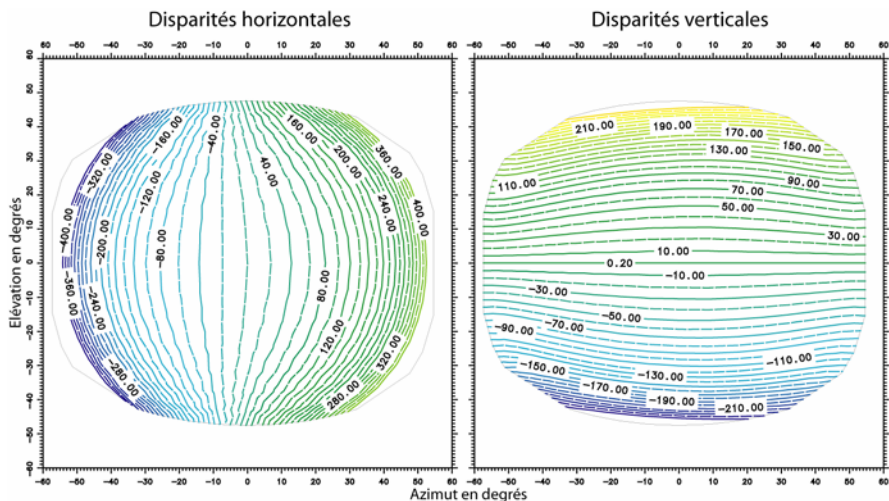


Figure 15 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres anisométriques de correction : OD = +2,00 ; OG = +4,00. Les deux verres ont la même base correspondant au choix standard, c'est-à-dire la base la plus plate (celle de l'œil droit = 7,25).

perception de profondeur entre les disparités horizontales et verticales. Notons que le choix de bases pour les deux verres influence peu la distribution relative des disparités : seule la valeur maximale des disparités horizontales ou verticales dans le champ visuel considéré va varier selon le choix des bases, et dans une très faible mesure.

Les observations cliniques soulignent que les patients anisométriques porteurs de correction en lunettes semblent présenter des symptômes tels que de l'asthénopie, des céphalées ou encore des nausées⁸, et dans certains cas (avec une fréquence de moins de 9 %) des déformations de l'espace visuel⁹. Ces symptômes peuvent en partie s'expliquer par la présence des disparités binoculaires décrites ci-dessus et en particulier par le conflit de perception entre les disparités horizontales et les disparités verticales. De même, l'aniséikonie également rencontrée chez les porteurs anisométriques indique clairement la présence de disparités trop importantes pour être fusionnées. En effet, les disparités très importantes peuvent ne pas être fusionnées, mais, si elles le sont, entraînent des modifications importantes de la profondeur.

Discussion

La modification de certains paramètres de montage, de fixation ou de choix des verres va modifier les disparités binoculaires dans le champ visuel : d'abord la puissance des verres est un paramètre important, les disparités sont globalement moins importantes pour les verres de puissance négative que les verres de puissance positive, pour la même puissance en valeur absolue. De même, pour diminuer légèrement les disparités horizontales dans le champ, il vaudra mieux augmenter la base, la diminuer entraînerait une augmentation des disparités. Néanmoins la modification de la base produira un conflit entre l'amélioration de la perception de la profondeur et l'esthétique des verres, obtenu avec la base de Tscherning, sachant que l'effet de la base sur les disparités est assez faible. On observe également que les décentrement possibles, causés par des erreurs de montage ou choisis dans le cas des prescriptions prismatiques, modifient sensiblement les disparités et pourront donc se traduire par une gêne visuelle du porteur percevant des déformations plus importantes dans ce cas. Enfin, de plus en plus de montures solaires sont très galbées, et lorsque l'on souhaitera adapter la

correction du porteur à ce type de montage, on va également provoquer une augmentation conséquente des disparités binoculaires, source de modification importante de la perception de la profondeur. Ces modifications peuvent être d'autant plus perturbantes pour le porteur que les disparités horizontales et verticales se trouvent en conflit pour le sens du relief produit. Enfin, les prescriptions particulières des porteurs (astigmatisme, anisométrie) peuvent également créer un conflit entre le relief produit par les disparités horizontales et le relief produit par les disparités verticales. En particulier, l'anisométrie crée de fortes disparités horizontales et verticales, de signe de relief opposé, qui peuvent expliquer les difficultés rencontrées par les porteurs anisométriques.

Dans la littérature, des seuils de stéréoaïté en fonction de l'azimut ont été mesurés, mettant en évidence une diminution de la sensibilité aux disparités horizontales avec l'excentricité¹⁰. Les seuils d'acuité stéréoscopique mesurés sont d'environ 3,2 arcmin à 6° et 5,8 arcmin à 8°. Ces valeurs sont supérieures aux valeurs calculées dans la plupart des cas décrits dans la présente analyse aux excentricités équivalentes, à l'exception essentiellement de l'exemple d'anisométrie. La plupart des disparités horizontales induites par les verres ophtalmiques, pour les corrections les plus courantes, semble finalement ne pas modifier de façon importante la perception de la profondeur.

D'autre part, dans l'espace personnel, les disparités binoculaires servent essentiellement à apprécier les distances des objets accessibles par les mains, elles sont donc particulièrement utilisées pour la préhension d'objets par exemple. Le port de lunettes, introduisant des modifications des disparités dans le champ visuel, modifie donc l'appréciation de la distance de l'objet avant l'initiation

du mouvement pour l'attraper. L'erreur d'appréciation de distance serait perceptible si l'individu fermait les yeux pendant le mouvement de son bras et de sa main. Or, la plupart du temps, l'individu garde ses yeux ouverts pendant le déplacement de son bras, ce qui lui permet d'analyser en direct les disparités de sa main par rapport à celle de l'objet, tout au long de sa trajectoire. Ce traitement à chaque instant, par le cerveau, permet à l'individu d'atteindre sa cible sans se tromper.

Conclusion

En conclusion, les couples de verres ophtalmiques introduisent des disparités binoculaires, horizontales et verticales, qui viennent s'ajouter aux disparités existant naturellement dans les scènes visuelles. Des situations assez fréquentes, telles que les fortes corrections myopiques ou hypermétropiques, les astigmatismes ou les anisométries, vont engendrer encore plus de disparités. Dans la plupart des cas, le porteur s'habitue très bien aux déformations produites par les verres, ou bien le porteur adaptera son comportement visuel ou sa posture afin de réduire les déformations gênantes, dues aux disparités. Il est important de ne pas perdre de vue que le système nerveux, qui traite les images disparates provenant des deux rétines, est capable de compenser des déformations importantes permettant une adaptation quasi-instantanée du porteur à ses lunettes de vue. Dans tous les cas, le centrage des verres est très important puisque quelques millimètres augmentent ces disparités pouvant modifier la perception de la profondeur. Par conséquent, les prises de mesures et ensuite le centrage des verres sont primordiaux lors de la réalisation d'un équipement en lunettes.

Références :

- ¹ **Cutting J.E., Vishton P.M. (1995).** Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. Perception of Space and motion, W. Epstein and S. Rogers ed., San Siego, CA: Academic Press, Chap.3, 69-117.
- ² **Bourdy, C. (1989).** Reconstruction et interprétation 3D en vision binoculaire humaine. Traitement de « l'information disparité ». *Journal of Optics*, **20**, 243-258.
- ³ **Collewijn H., Steiman R.M., Erkelens C.J., Regan D. (1991).** Binocular fusion, stereopsis and stereoacuity with a moving head, Chap.7. Vision and visual dysfunction, Vol.9, Ed. D. Regan, Macmillan, London.
- ⁴ **Howard J.P., Rogers B.J. (2002).** Classification of binocular disparity, Chap. 20. Seeing in Depth, Vol.2 Depth Perception, I Porteous, University of Toronto Press, Toronto.
- ⁵ **Matthews N., Meng X., Xu P., Qian N. (2003).** A physiological theory of depth perception from vertical disparity. *Vision Research*, **43**, 85-99.
- ⁶ **Ogle, K.N. (1950).** The induced Effect, Chap.19. Research in Binocular Vision, Press of W.B. Saunders Company, Philadelphia and London.
- ⁷ **Tscherning M. (1904).** Verres de lunettes. Encyclopédie Française d'ophtalmologie, Vol. 3, Ed. Lagrande F. et Valude E., Paris : Octave Doin.
- ⁸ **Borish I.M., Benjamin W.J. (1998).** Patients with anisometropia and aniseikonia, Chap.29, Section 5. Clinical Refraction, Ed. W. J. Benjamin, Press of W. B. Saunders Company, Philadelphia and London.
- ⁹ **Minichiello A.B (1991).** Mesure de l'aniséiconie à l'aide de deux biprismes. Acta Strabologica. Proc. Internat. Symp. Strabismus and amblyopia. CERES, Paris.
- ¹⁰ **Rawlings S.C., Shipley T. (1969).** Stereoscopic acuity and horizontal angular distance from fixation. *Journal of the Optical Society of America*, **59**, 991-993.